

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM TIRANTE EM ARGILA MOLE

Mauricio Ehrlich

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovada por:



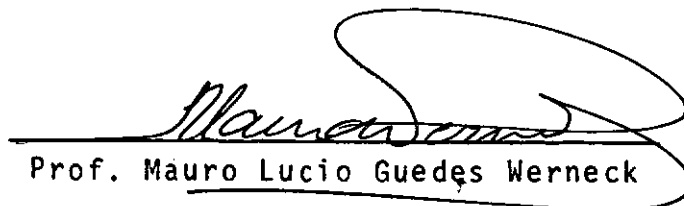
Prof. Willy Alvarenga Lacerda  
(Presidente)



Prof. Antonio José da Costa Nunes



Prof. Fernando L.B. Lobo Carneiro



Prof. Mauro Lucio Guedes Werneck

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
FEVEREIRO DE 1978

i

A meus pais.

i

## AGRADECIMENTOS

Agradeço às diversas entidades e pessoas que com sua contribuição tornaram possível a realização desse trabalho.

CAPES e COPPE - pelo apoio financeiro.

TECNOLOSO S.A. - pelo financiamento e execução dos tirantes experimentais.

Prof. WILLY ALVARANGA LACERDA - pela orientação e apoio na realização desse trabalho.

Prof. MAURO LUCIO GUEDES WERNECK - pela revisão do texto.

Engenheiro MOISES SZWARCBARG da Companhia do Metropolitan do Rio de Janeiro - pelo auxílio junto à chefia da obra da estação Uruguaiana do Metropolitan.

Engenheiro LUCIANO BORGES RIBEIRO, chefe da obra da estação Uruguaiana, Engenheiro NELSON RICARDO DOMINGUES e funcionários GENTIL PORTO DE SOUSA VIANA, MIGUEL ALCANTARA

DE ARAUJO, ANTONIO ROSA DE OLIVEIRA FILHO, JOSÉ ELFREDO COLA  
RES GONSALVES, CLAIR RANGEL, JORGE LUIS AZEREDO DE AZEVEDO,  
WILSON DOS REIS, RICARDO GOSSNESS, URUARAI CANDEIAS, FABIO  
MARQUES SOARES JUNIOR da EICEL - Empresa Auxiliar de Obras  
Ltda. - pela boa vontade em auxiliar-nos no que se fez nece  
cessário na realização dos ensaios experimentais.

RODIO S.A. - pela doação das cunhas freyssinet  
de ancoragem.

Engenheira HENRIQUETA CUNHA CORREIA e Técnicos  
HELICIO GONÇALVES DE SOUZA, JOSE LUIS DO NASCIMENTO SILVA, WALT  
TER MAGIOLI DE MELLO NETO, EDUARDO NAZARETH PAIVA da COPPETEC  
- pelo auxílio na realização dos ensaios experimentais.

ALVARO DE SOUZA FERREIRA, NIVALDO DAS CHAGAS, ARN  
NALDO TERTULIANO, ROMEU BARRETO DE MENEZES funcionários da  
COPPE - pela execução dos equipamentos.

Professor FERNANDO EMANUEL BARATA - pelo incent  
tivo e orientação que me conduziram à especialidade de Mecâ  
nica dos Solos.

Aos Professores do Programa de Engenharia Civil  
da COPPE - pela dedicação e amizade.

À DORISE SERMAM minha futura esposa - pela real  
ização da parte gráfica da tese.

À WANDA FRANÇA ROCHA - pelo trabalho datilográfico.

A minha família

e a Deus.

## SUMÁRIO

Este trabalho aborda o comportamento reológico de tirantes em argila mole. Também consta desta pesquisa a análise da capacidade de carga, sensibilidade na ruptura, e característica tensão-deslocamento de tirantes, bem como a influência da alongabilidade do bulbo de ancoragem nos comportamentos citados.

Desenvolveu-se uma expressão que permite o cálculo da distribuição de tensões cisalhantes ao longo do fuste de tirantes de bulbo tracionado, e estabeleceu-se um índice representativo da característica de alongabilidade de tirantes de bulbo tracionado.

Estudou-se através de ensaios de campo o comportamento quanto à capacidade de carga, característica tensão-deslocamento, e sensibilidade, sendo as influências reolôgicas estudadas através de ensaios de fluência. A análise desses resultados experimentais foi realizada utilizando-se de resultados de ensaios de laboratório em amostras indeformas do material de fundação.

Apresenta-se uma análise teórica da influência da alongabilidade do bulbo de tirantes na capacidade de carga e comportamento tensão-tempo-deslocamento, constando também desta análise a comparação das previsões teóricas com os resultados experimentais obtidos.

Finalmente analisou-se os ensaios de fluência e efetuados nos tirantes experimentais, de acordo com as recomendações da ABNT, P-NB-565.

## SUMMARY

This dissertation is on the reological behavior of anchors in soft clay, including analyses of load capacity, sensitivity at rupture, stress-displacement characteristics and the influence on them of the elongability of the anchor-bulb.

A mathematical expression for the shear stress distribution along anchor bulbs was developed, an index representative of the elongability of anchors being established.

By means of field load test, load-capacity, stress-strain characteristics and sensitivity at rupture of anchors in soft clay were determined. The influence of time was assessed by means of creep tests. The field test were analyzed with the aid of laboratory shear strength and creep tests on undisturbed soil samples.

The influence of the elongability of the bulb on the load capacity and the stress-displacement-time behavior



of anchors were theoretically analyzed and comparisons with experimental results were made.

The field creep tests were also analyzed according to the Brazilian Standard ABNT, P-NB-565.

ÍNDICE

| Capítulos: |                                                                                                                                        | Páginas: |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| I          | INTRODUÇÃO .....                                                                                                                       | 1        |
| II         | REVISÃO DA LITERATURA .....                                                                                                            | 5        |
| II.1       | CAPACIDADE DE CARGA EM TIRANTES                                                                                                        | 5        |
| II.2       | "CONSTRUÇÃO, CAPACIDADE DE CAR<br>GA E FLUÊNCIA DE TIRANTES EM SO<br>LO", POR H. OSTERMAYER (TRADU<br>ÇÃO LIVRE PARCIAL SUMARIZADA) .. | 9        |
| II.3       | COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO-<br>-TEMPO NOS SOLOS .....                                                                             | 23       |
| II.4       | NORMA BRASILEIRA (ABNT, P-NB-565)<br>EM ESTÁGIO EXPERIMENTAL .....                                                                     | 28       |
| III        | TIRANTES EXPERIMENTAIS .....                                                                                                           | 32       |
| III.1      | GENERALIDADES .....                                                                                                                    | 32       |
| III.2      | CARACTERÍSTICAS DO DEPÓSITO AR<br>GILOSO .....                                                                                         | 33       |
| III.2.1    | Introdução .....                                                                                                                       | 33       |
| III.2.2    | Ensaio de Caracterização ..                                                                                                            | 34       |
| III.2.3    | Ensaio Triaxiais .....                                                                                                                 | 35       |

## Capítulos:

## Páginas:

|           |                                                                                                                                    |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.2.3.1 | Ensaio <u>s</u> Triaxiais Não-Aden <u>s</u> ados Não-Drenados (UU) ..                                                              | 35 |
| III.2.3.2 | Ensaio <u>s</u> Triaxiais Adensa <u>d</u> os Isotropicamente Não-Drenados com Medição de Pressão Neutra ( $\overline{CIU}$ ) ..... | 37 |
| III.2.3.3 | Relação Tensão-De <u>fo</u> rmação-Tempo .....                                                                                     | 38 |
| III.3     | CARACTERÍSTICA ESTRUTURAL DOS TIRANTES QUANTO A DEFORMAÇÃO DO BULBO ANCORADO .....                                                 | 39 |
| III.3.1   | Introdução .....                                                                                                                   | 39 |
| III.3.2   | Característica Estrutural dos Tirantes Utilizados na Pes <u>q</u> uisa .....                                                       | 46 |
| III.4     | EXECUÇÃO .....                                                                                                                     | 49 |
| IV        | EQUIPAMENTOS .....                                                                                                                 | 81 |
| IV.1      | ESQUEMA DE ENSAIO .....                                                                                                            | 81 |
| IV.2      | EQUIPAMENTO DE CARGA CONSTANTE.                                                                                                    | 83 |
| IV.3      | EQUIPAMENTO DE MEDIDA DE DESLO <u>c</u> AMENTO .....                                                                               | 84 |
| V         | RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS .....                                                                                             | 95 |
| V.1       | INTRODUÇÃO .....                                                                                                                   | 95 |
| V.2       | ENSAIOS COM O TIRANTE S-5 TIPO I                                                                                                   | 96 |

| Capítulos: | Páginas:                                                                                        |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V.2.1      | Introdução ..... 96                                                                             |
| V.2.2      | Capacidade de Carga ..... 97                                                                    |
| V.2.3      | Sensibilidade ..... 102                                                                         |
| V.2.4      | Comportamento Tensão-Desloca<br>mento-Tempo ..... 104                                           |
| V.3        | ENSAIOS COM O TIRANTE S-1 TIPO I 108                                                            |
| V.3.1      | Introdução ..... 108                                                                            |
| V.3.2      | Ensaio de Primeiro Carregamen<br>to ..... 110                                                   |
| V.3.3      | Ensaio de Recarregamento ..... 115                                                              |
| V.3.4      | Capacidade de Carga ..... 121                                                                   |
| V.3.5      | Sensibilidade ..... 127                                                                         |
| V.3.6      | Comportamento Tensão-Desloca<br>mento-Tempo ..... 130                                           |
| V.3.6.1    | Comportamento Tempo-Desloca<br>mento ..... 130                                                  |
| V.3.6.2    | Comportamento Tensão-Desloca<br>mento ..... 137                                                 |
| V.3.6.3    | Comportamento Velocidade de<br>Deslocamento-Tensão e Veloci<br>dade de Deslocamento-Tempo.. 140 |
| V.4        | ENSAIOS COM O TIRANTE S-3 TIPO I 148                                                            |
| V.4.1      | Introdução ..... 148                                                                            |
| V.4.2      | Ensaio de Carregamento ..... 149                                                                |
| V.4.3      | Capacidade de Carga e Sensibi<br>lidade ..... 152                                               |

## Capítulos:

## Páginas:

|         |                                                                                                                   |     |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| V.4.4   | Comportamento Tensão-Desloca-<br>mento-Tempo .....                                                                | 152 |
| V.4.4.1 | Comportamento Tempo-Desloca-<br>mento .....                                                                       | 152 |
| V.4.4.2 | Comportamento Tensão-Desloca <u>men</u><br>to .....                                                               | 154 |
| V.4.4.3 | Comportamento Velocidade de<br>Deslocamento-Tensão e Veloci <u>da</u><br>de de Deslocamento-Tempo..               | 157 |
| V.5     | ENSAIOS COM O TIRANTE S-4 TIPO II                                                                                 | 161 |
| V.5.1   | Introdução .....                                                                                                  | 161 |
| V.5.2   | Ensaio de Primeiro Carregamen <u>to</u><br>to .....                                                               | 162 |
| V.5.3   | Ensaio de Recarregamento ....                                                                                     | 164 |
| V.5.4   | Capacidade de Carga .....                                                                                         | 166 |
| V.5.5   | Sensibilidade .....                                                                                               | 171 |
| V.5.6   | Comportamento Tensão-Desloca <u>men</u><br>to-Tempo .....                                                         | 174 |
| VI      | COMENTÁRIOS SOBRE A INFLUÊNCIA DA DIS-<br>TRIBUIÇÃO ESPECÍFICA DE TENSÕES NO COM-<br>PORTAMENTO DE TIRANTES ..... | 294 |
| VI.1    | INTRODUÇÃO .....                                                                                                  | 294 |
| VI.2    | CAPACIDADE DE CARGA .....                                                                                         | 294 |
| VI.3    | COMPORTAMENTO TENSÃO-DESLOCAMEN <u>to</u><br>TO-TEMPO .....                                                       | 297 |

Capítulos:

Páginas:

|        |                                                                                                       |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| VII    | VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS TIRAN <u>T</u><br>TES ENSAIADOS, SEGUNDO A ABNT, P-NB-<br>-565 ..... | 302 |
| VII.1  | INTRODUÇÃO .....                                                                                      | 302 |
| VII.2  | TIRANTE S-5 TIPO I .....                                                                              | 302 |
| VII.3  | TIRANTE S-1 TIPO I .....                                                                              | 304 |
| VII.4  | TIRANTE S-3 TIPO I .....                                                                              | 305 |
| VII.5  | TIRANTE S-4 TIPO II .....                                                                             | 307 |
| VIII   | SUMÁRIO DE CONCLUSÕES .....                                                                           | 308 |
| VIII.1 | ALONGABILIDADE DO BULBO ANCOR <u>A</u><br>DO .....                                                    | 308 |
| VIII.2 | CAPACIDADE DE CARGA .....                                                                             | 309 |
| VIII.3 | SENSIBILIDADE .....                                                                                   | 311 |
| VIII.4 | COMPORTAMENTO TENSÃO-TEMPO-<br>-DESLOCAMENTO .....                                                    | 312 |
| IX     | COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES .....                                                                  | 319 |
|        | BIBLIOGRAFIA .....                                                                                    | 321 |

## Apêndices:

Páginas:

|   |                                                                                                                                                     |     |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1 | DEDUÇÃO DA EXPRESSÃO DO DESENVOLVIMEN <u>TO</u> DE TENSÕES CISALHANTES AO LONGO DO FUSTE DE ANCORAGEM DE TIRANTES DE BUL <u>BO</u> TRACIONADO ..... | 324 |
| 2 | EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO DA EXPRESSÃO ES <u>TA</u> BELECIDA NO APÊNDICE 1 .....                                                                       | 336 |
|   | SIMBOLOGIA .....                                                                                                                                    | 350 |

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

A utilização de tirantes vem sendo cada vez mais adotada como solução em obras de engenharia.

Um grande número de publicações sobre estudos teóricos e experimentais desses elementos, principalmente quanto à capacidade de carga e processos executivos, são encontrados na bibliografia internacional. Entretanto, pouca ênfase é dada ao aspecto do comportamento reológico dos mesmos.

Considera-se, principalmente com base em instrumentação de tirantes utilizados em obras diversas, de pouca influência com vista a fins práticos o comportamento reológico em tirantes executados e aceitos por ensaios de precargamento, seguindo normas baseadas em experiências executivas acumuladas.

Visando-se como meta principal o estudo do com



portamento reológico destes elementos, optou-se nesta pesquisa, pela análise de comportamento de tirantes estabelecidos em solo sedimentar argiloso orgânico, em virtude da magnitude de destes efeitos neste material. Tratou-se também, neste trabalho, da análise do comportamento tensão-deformação, sensibilidade, e capacidade de carga.

Os resultados desta pesquisa confirmaram, pelo menos para este caso, os conceitos gerais pré-estabelecidos da pouca influência dos efeitos reológicos com vista a fins práticos, em tirantes. Logo em seguida ao acréscimo de carregamento, os tirantes tendiam a estabilizar-se em certa deformação.

Realizada a análise dos ensaios experimentais, verificou-se consonância com a teoria de Mitchel para o efeito de fluência ("creep"). Entretanto questiona-se a validade da extrapolação direta de resultados obtidos segundo ensaios de laboratório triaxiais isotrópicos.

No Capítulo II é feita uma revisão da literatura existente sobre o assunto. São apresentadas considerações baseadas em estudos teóricos e experimentais de campo e laboratório sobre o problema da capacidade de carga em tirantes. Também são apresentados estudos sobre fluência em tirantes e parte da Norma Brasileira (P-NB-565), em estágio experimental. E, finalmente, um apanhado bibliográfico sobre fluência nos solos.

.

No Capítulo III descrevem-se as propriedades e apresentam-se parâmetros de resistência e fluência da argila do depósito obtidas em ensaios de laboratório com o material em questão por Vilela <sup>9</sup>. Relata-se a execução e o plano de ensaios dos tirantes, bem como suas características estruturais.

No Capítulo IV é apresentado o esquema dos equipamentos para ensaio e uma descrição dos mesmos.

O Capítulo V consiste na apresentação e análise dos resultados experimentais obtidos.

No Capítulo VI são feitas considerações teóricas, e comparados os resultados obtidos experimentalmente sobre a influência da alongabilidade do bulbo no comportamento de tirantes.

No Capítulo VII é realizada uma análise dos tirantes ensaiados segundo a ABNT, P-NB-565.

No Capítulo VIII é feito um sumário das conclusões obtidas na pesquisa.

Finalmente no Capítulo IX são apresentados os comentários finais sobre esta pesquisa e sugestões para pesquisas futuras.

Em Apêndices são apresentados a dedução e exem  
plos de aplicação da expressão deduzida para a distribuição  
de tensões cisalhantes ao longo de ancoragens de bulbo tra  
cionado.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO DA LITERATURA

#### II.1 - CAPACIDADE DE CARGA EM TIRANTES

Vesic<sup>1</sup> realiza uma análise bibliográfica do desenvolvimento da pesquisa da capacidade de carga em tirantes, a qual é transcrita a seguir.

*"Um grande número de investigações quanto à capacidade de carga de ancoragens foi realizada no passado."*

*"O trabalho anterior a 1960 consiste basicamente em ensaios de fundações de torres de transmissão e estudos teóricos sobre capacidade de carga."*

*"A pesquisa moderna nesse assunto iniciou-se com um trabalho de Balla, o qual determinou a forma das superfícies de ruptura para placas de ancoragem em areia compacta a pequena profundidade e propôs um método racional de análise da capacidade de carga baseado na conformação dessas superfícies."*

cies de ruptura."

"Baker e Konder confirmaram o trabalho de Balla sobre placas de ancoragem em areia compacta, acrescentando a constatação do diferente comportamento de ancoragens profundas e rasas."

"Mariupol Skii, também verificou o comportamento distinto entre ancoragens profundas e rasas, propondo procedimentos analíticos diversos para os dois casos."

"Sutherland apresentou resultados bem documentados de ensaios de capacidade de carga em modelos de placas de ancoragem acima de 6 polegadas de diâmetro em areia fofa e compacta, assim como em tubulões de 34 polegadas de diâmetro em areias medianamente compactas a compactas. Verificou nestes ensaios que o modo de ruptura varia também com a densidade da areia, e mostrou que a solução analítica de Balla pode fornecer valores razoáveis para caso de tirantes em areias de densidade intermediária."

"Kamanyan também apresentou resultados bem documentados de ensaios de capacidade de carga em modelos de placas de ancoragem superiores a 48 polegadas em um dep<sup>o</sup>sito de areia fina fofa a medianamente compacta. Esta pesquisa inclue uma série de ensaios com placas inclinadas com carregamento axial. Observou-se nesses ensaios formas de ruptura similares às obtidas pelos autores precedentes, apresentando-

-se bem definidas as superfícies de ruptura. No caso de placas inclinadas, o comportamento foi assimétrico e o movimento das partículas do solo acima da placa foi predominantemente vertical, verificando-se geralmente um aumento da capacidade de carga com a inclinação das placas."

"Mais recentemente, na Universidade de Duke, foram realizados ensaios em modelos de placas e hastes de ancoragem em areia fofa e compacta, assim como em argila mole (resistência não drenada de  $0,05 \text{ Kgf/cm}^2$ ) e argila siltosa rija (resistência não drenada de  $0,5 \text{ Kgf/cm}^2$ ). As formas de ruptura foram analisadas em grande detalhe, ficando salientado que a transição do comportamento de ancoragens profundas em ensaios de placa se desenvolviam nas argilas muito moles e areias fofas a profundidades de somente dois ou três diâmetros da placa de ancoragem, enquanto em argila siltosa a transição foi verificada numa profundidade de cinco diâmetros, apresentando-se para o caso de areias densas igual a dez diâmetros. Estes ensaios também revelaram a importância relativa dos esforços de sucção em argilas muito moles, os quais foram predominantes no valor da capacidade de carga das ancoragens de placas rasas em argila mole. Algumas destas conclusões são confirmadas nos resultados da investigação paralela realizada na Hydro-Electric Power Commission em Ontario e no Nova Scotia Technical College. Apresentam-se também nestas últimas investigações alguns dados sobre capacidade de carga de grupos de ancoragens em haste, assim como o efeito na capacidade de carga de carregamentos a longo prazo em

*solos coesivos."*

Este conjunto de trabalhos retrata uma preocupação principal com a capacidade de carga a curto termo de ancoragens, principalmente para o caso de placas ancoradas. Entretanto, algumas conclusões quanto a comportamento a longo termo ficam salientadas.

Meyerhof e Adams<sup>2</sup>, através da pesquisa realizada na Hydro-Eletric Power Commission e Nova Scotia Technical College apresentam resultados de ensaios de capacidade de carga-drenados (carregamento lento) em material coesivo, com vista a comportamentos a longo prazo.

No trabalho realizado na Universidade de Duke, Bhatnagar<sup>3</sup> assinala, que sob um carregamento de 50% da carga de ruptura nos ensaios realizados em modelos de placas em argila siltosa, fazia-se necessário um intervalo de cerca de 5 minutos de modo a atingir-se o deslocamento máximo, salientando que este período aumentava progressivamente com o nível de tensões. Nesta pesquisa também ficou caracterizado o menor tempo necessário à estabilização de deslocamento das ancoragens de haste relativamente às de placa. Analisando estes fenômenos o autor concluiu serem os mesmos originários do adensamento do material, o que nos parece improvável em vista da baixa capacidade de dissipação de poro-pressão do material (uma argila siltosa de coeficiente de adensamento da ordem de  $10^{-4}$  cm/s<sup>2</sup>) relativamente ao período de estabilização dos deslocamentos (5 minutos).

Vesic<sup>1</sup> assinala a influência do tempo de ruptura e do tipo de carregamento na capacidade de carga de tirantes, em vista da influência desses fatores no comportamento dos solos.

Ostermayer<sup>4</sup>, apresenta um trabalho baseado em um grande número de ensaios e instrumentação de obras nas quais são adotados tirantes de haste fundados em diversos tipos de materiais. Este trabalho, em vista do seu grande numero de informações, é transcrito parcialmente no item a seguir.

## II.2 - CONSTRUÇÃO, CAPACIDADE DE CARGA E FLUÊNCIA DE TIRANTES EM SOLO

("Construction, Carrying Behaviour, And Creep Characteristics of Ground Anchors"),  
por H. Ostermayer<sup>4</sup> tradução livre parcial sumarizada.

### A. ENSAIOS EM TIRANTES

#### A.1 Ensaio de Qualificação ("Fundamental Test").

"Permite-se a instalação de um sistema de atirantamento somente quando o sistema é submetido a um ensaio de qualificação, no qual três tirantes são tencionados a pelo menos 1,5 vezes a carga de trabalho e então escavado e cuidadadosamente examinado. O objetivo do ensaio é o de assegurar



que o sistema de ancoragem se apresenta conforme o esperado e detectar pequenos problemas que poderiam afetá-lo em um grande período de tempo."

"Os pontos nos quais deve-se ter um cuidado especial são a forma e a qualidade do bulbo ancorado, sua resistência e possíveis defeitos, as discrepâncias entre os comprimentos planejados e os obtidos na execução do tirante, o posicionamento dos cabos (se axial), verificação da cobertura de cimento dos cabos de atirantamento, a formação e distância entre as trincas de modo a calcular o total de trincamento sob carregamento, e a qualidade do revestimento contra corrosão principalmente no caso de ancoragens permanentes."

#### A.2 Ensaio Básico ("Suitability Test")

"Antes de iniciado o trabalho construtivo, três ou quatro tirantes devem ser submetidos a um ensaio básico. Neste teste a ancoragem é submetida a ciclos de carga e descarga. Assim as deformações plásticas e elásticas podem ser verificadas para um carregamento 1,5 vezes superior à carga de trabalho. As deformações elásticas permitem o cálculo (ou verificação) do comprimento livre, e as deformações plásticas correspondem ao movimento do bulbo. Através do comportamento destas deformações fica salientada a capacidade de carga de um tirante."

"Além do valor final das deformações deve ser observado o comportamento tempo-deformação a carga constante para diversos estágios de carga. O comportamento quanto a fluência ("creep") é essencial na análise de ancoragens permanentes (para solos coesivos o tempo mínimo de observação é 24 horas para 1,5 vezes a carga de trabalho)."

### A.3 Ensaio de Recebimento ("Acceptance Test")

"Variações nas condições do solo e processo de instalação podem ocasionar grandes variações na capacidade de carga dos tirantes; assim, é essencial que cada tirante seja submetido a um ensaio individual. De modo a obter a carga de trabalho admissível dos cabos de ancoragem foi estipulado um fator de segurança de 1,75 com relação a tensão de escoamento do aço. A carga de teste  $T_x$  para ancoragens temporárias deve ser igual 1,2 vezes a carga de trabalho  $T_w$ , sendo necessário se ensaiar 5% dos tirantes a 1,5 vezes a carga de trabalho."

"No caso de ancoragens permanentes, cada tirante deve ser submetido a um carregamento igual a 1,5 vezes a carga de trabalho."

## B. EXPERIÊNCIAS GANHAS EM ENSAIOS

### B.1 Solos Não-Coesivos

"Nos solos não-coesivos a técnica de abertura do furo (dinâmica (ramming) ou escavação com ou sem circulação de água), não tem influência decisiva na qualidade e capacidade de carga de ancoragens."

"É entretanto essencial que a nata de cimento seja injetada com pressões iguais ou superiores a  $10 \text{ Kgf/cm}^2$ , assim promovendo a reconstituição de possíveis zonas de afogamento geradas pela execução."

"Dessa reconstituição resultará uma melhoria do atrito no contato solo bulbo-ancorado. Além do que, sob esta pressão, parte da água é expulsa da nata de cimento, diminuindo o fator água-cimento, melhorando a qualidade do bulbo ancorado."

### B.2 Solos Coesivos

"Nos solos coesivos a técnica de abertura do furo tem influência decisiva na qualidade e capacidade de carga em ancoragens. Escavações sem revestimento ou com revestimento, combinadas com o uso de injeção da água sob pressão geralmente resultam em menores valores para capacidade de carga. Do ponto de vista econômico a circulação de água é usada

da em solos coesivos. Nesses casos é importante que imediatamente após a limpeza do furo, seja realizada a ancoragem dos tirantes, iniciando-se a partir da extremidade inferior a injeção com nata de cimento de fator água-cimento 0,4."

"A capacidade de carga é grandemente aumentada com a utilização de pós-injeção. Este processo consiste em prover um ou mais tubos para posterior reinjeção do bulbo de ancoragem. Destes tubos constam válvulas que permitem uma ou mais reinjeções. Durante o processo de reinjeção o trecho ancorado trinca-se, sendo as trincas formadas simultaneamente preenchidas, concorrendo para que a massa monolítica alargada, comprima-se contra o solo."

## C. CAPACIDADE DE CARGA

### C.1 Experiências Para Determinação do Comportamento Quanto a Capacidade de Carga

"Carga acima de 80 tons em solos coesivos, e acima de 150 tons nos solos não coesivos, para ancoragens de 10-15 cm de diâmetro e 4-8 metros de comprimento, não podem ser estimadas por meio das leis clássicas da Mecânica dos Solos. Assim, por este motivo, faz-se necessária a coletânea de dados empíricos das condições do solo, dimensões de ancoragem e métodos de instalação."

"Em um programa de pesquisa com vistas à perfor

mance de tirantes, depois da análise dos resultados dos ensaíes fundamentais, novos ensaios foram realizados nos quais o diâmetro e o comprimento de ancoragem eram as variáveis. Após o final dos ensaios os tirantes foram escavados e cuidadosamente analisados."

"Ensaíes em modelos realizados por Werner em areia, apresentaram uma boa concordância com os ensaios de campo. Nestes modelos a influência da densidade relativa e do tamanho do bulbo de ancoragem foram examinados. Wernick também realizou ensaios em modelos em areia com medição das tensões radiais no solo. Estas medições confirmaram a hipótese que a alta capacidade de carga de uma ancoragem é em parte devida ao efeito do "interlocking" no solo."

## C.2 Capacidade de Carga em Solos Não-Coesivos

(Solos de Compacidade de Média a Muito Compacta)

### ENSAIOS DE CAMPO

"Para um dado solo a capacidade de carga aumenta rapidamente com o aumento da densidade. Por exemplo, para as areias pedregulhosas, quando muito compactas os valores são 80% superiores aos do mesmo solo quando medianamente compactos."

"Para o mesmo valor de densidade relativa a capa

cidade de carga aumenta com o aumento do coeficiente de uni-  
formidade (U). Por exemplo, para um pedregulho arenoso com  
pacto com  $U = 5-33$  a capacidade de carga é 50% maior do que  
para areias compactas com  $U = 1,6-3,1$ .

"O valor da capacidade de carga de ancoragens ten-  
de a estabilização com o aumento de comprimento do bulbo an-  
corado; desta forma, um comprimento 6-7 metros é ideal do  
ponto de vista econômico."

"Acima do diâmetro de 10 cm verifica-se um peque-  
no incremento na capacidade de carga, com o aumento do diâme-  
tro do bulbo."

"A técnica de abertura do furo (percução ("nam-  
ming") e escavação) não tem influência na capacidade de car-  
ga."

"Considerando para cálculo uma distribuição de ten-  
sões uniforme ao longo do bulbo de ancoragem, verifica-se ne-  
dugão na tensão resistente ao longo do fuste com o aumento  
do comprimento ancorado. O motivo de tal comportamento é  
que grandes deformações elásticas diferenciais se verificam  
ao longo do bulbo ancorado num processo de ruptura progressi-  
va do contato com o solo."

"Os valores calculados para tensão resistente ao  
longo do fuste é da ordem de  $5 \text{ Kg/cm}^2$  para areias e maior  
que  $10 \text{ Kg/cm}^2$  para pedregulhos arenosos. Estes valores po-

dem ser explicados como originários de fenômenos de "interlocking". O efeito desse fenômeno é o incremento da tensão normal no contato bulbo solo, devendo representar pressões da ordem de 2-10 vezes superiores a pressão pré-existente ao ensaio. O fenômeno de "interlocking" que é função direta da compacidade do solo é oriundo das tendências dilatantes dos solos densos quando cisalhados, resultando em aumento da tensão radial."

### ENSAIOS EM MODELOS

"As tensões radiais mencionadas acima foram medidas por Wernick em ensaios em modelos. Como esperado, a tensão radial e conseqüentemente as tensões resistentes de atrito decresceram com o aumento do diâmetro."

"A influência do diâmetro do bulbo de ancoragem e da densidade relativa dos solos foi também investigada por Werner em 150 ensaios de modelos, demonstrando que a tensão resistente de atrito (como resultado do "interlocking") era superior aos valores calculados com base na pressão pré-existente."

"Nos ensaios em modelos o efeito da redução da tensão resistente média com o comprimento de ancoragem não ficou demonstrado, pois o processo de ruptura progressiva originário das deformações elásticas dos cabos de ancoragem não pode ser reproduzido nos modelos de ensaio."

## C.2 Capacidade de Carga em Solos Coesivos

### (Solos de Coesistência de Rija a Muito Dura)

"A tensão aderente ao longo do fuste de ancoragem é independente do diâmetro do bulbo dentro da faixa 9-16 cm; assim, a capacidade de carga cresce com o diâmetro."

"A tensão aderente é independente do comprimento de ancoragem, para tensões de aderência inferiores a  $1 \text{ Kgf/cm}^2$ . Para valores superiores a estes, um pequeno decréscimo deve ser esperado com o aumento do comprimento, mas, grosseiramente, é válido se considerar a constância."

"A tensão de aderência aumenta com a consistência e decresce com a plasticidade. Em argilas rijas ( $IC = 0,8 - 1,0$ ) de média a alta plasticidade os valores  $0,3 - 0,8 \text{ Kgf/cm}^2$  foram os menores. Siltes arenosos de média plasticidade e consistência dura ( $IC = 1,25$ ) forneceram os maiores valores, da ordem de  $4 \text{ Kgf/cm}^2$ ."

"A tensão de aderência aumentou significativamente com o emprego de pós-injeção. Usando o método, o valor acresceu-se no caso de uma argila rija de plasticidade de média a alta de 1,2 para  $3 \text{ Kgf/cm}^2$ ."



#### D. COMPORTAMENTO QUANTO A FLUÊNCIA

"Antes de ser atingida a ruptura, grandes deformações de fluência sob carga constante podem ser verificadas em solos coesivos e não coesivos. Para projeto de tirantes permanentes é essencial o conhecimento desse comportamento."

"Geralmente a relação entre o deslocamento fluencial e o tempo é uma função exponencial, isto é, uma linha reta é obtida quando plotada em escala semi-logarítma."

"De acordo com a Figura (II.1) o coeficiente angu<sup>lar</sup> desta reta  $K_s$ , é definida como coeficiente de fluência. Este coeficiente sofre incrementos a cada novo estágio de carga. Quando a carga de ruptura é atingida os deslocamentos não mais decrescem com o tempo."

"Plotados valores de  $K_s$  com o nível de tensões (razão entre a carga aplicada e a de ruptura), verifica-se a existência de níveis tensões críticos, função do tipo de solo, a partir do qual estes coeficientes passam a sofrer um grande acrêscimo. Nos ensaios realizados, Figura (II.2), este nível apresentou-se igual a 40% para as argilas rijas de média a alta plasticidade, 55% para as argilas rijas a duras de média a alta plasticidade, 80% para as argilas duras de média a alta plasticidade, e 80% para o caso de areias bem graduadas mediantemente compactas a compactas."

"É claro que este comportamento plástico não é desejado no caso de ancoragens permanentes. Por esta razão, além de um fator de segurança à ruptura, faz-se necessário também a adoção de fatores de segurança para as deformações de fluência."

"Parte do deslocamento de fluência é devido à contribuição do deslocamento dos cabos do tirante relativamente ao bulbo de ancoragem, além da fluência do cimento de injeção e do aço dos cabos do tirante, correspondendo estes fatores geralmente a um coeficiente da ordem de 0,4 mm. Acrêscimos desse coeficiente além de 0,4 mm são originários de fluência no contato do solo com o bulbo ancorado."

"As linhas retas do comportamento tempo-deformação traçadas em escala semi-logaritma são típicas de bulbos de ancoragem retilíneos. No caso de ancoragens com fuste irregular (tipo "multi-underreamed"), grandes deslocamentos devem ser esperados em virtude de a concentração de tensões promover acréscimos na consolidação bem como do comportamento fluencial."

#### E. APROVAÇÃO E TESTES EM ANCORAGENS PERMANENTES

"Em virtude do fenômeno de fluência sob carga constante, e do comportamento menos conhecido sob cargas repetidas atualmente, a construção de ancoragens permanentes não é

aprovada nas seguintes situações: quando sob a atuação de cargas repetidas a variação do valor da carga atuante no tirante for maior que 20%; quando o solo tem grande porcentagem de matéria orgânica; quando o solo consiste de areia fofa; quando o mesmo é um solo coesivo com consistência  $IC < 0,9$  ou o limite de liquidez  $LL > 50\%$ ."

"O critério para ensaios básicos e aceitação no presente momento é que o coeficiente fluência  $K_s$  deve ser menor do que 2 mm sob um carregamento de 1,5 vezes a carga de trabalho."

"A adoção do critério acima é suficiente para situar um tirante num nível inferior ao critério. Entretanto, analisando o gráfico  $K_s$  versus nível de tensões obtido na série de ensaios efetuados Figura (11.2), verifica-se não ser este suficiente para fornecer, no caso de tirantes permanentes em pedregulhos, areias e argilas duras e rijas, um adequado fator de segurança a ruptura (1,75). Por esse motivo recomenda-se um coeficiente  $K_s$  igual ou inferior a 1 mm para 1,5 vezes a carga de trabalho. O valor de 1 mm para  $K_s$  corresponde a um deslocamento de 6 mm entre os intervalos de tempo de 30 minutos e 50 anos."

"A fim de se verificar a suscetibilidade a cargas repetidas, os tirantes devem ser testados ao menos para 20 ciclos de carga e descarga a um nível de tensões situado entre a metade e o valor total da carga de trabalho."

"Quando a instalação e o ensaio de ancoragem são feitos satisfatoriamente, a possibilidade de que a ruptura de um tirante ponha em risco a construção é muito pequena. Entretanto, é aconselhável a verificação das ancoragens a intervalos periódicos."

#### F. MEDIÇÕES DE CAMPO DE FLUÊNCIA

"Teoricamente é possível se calcular os deslocamentos do bulbo de tirantes originários do fenômeno da fluência, a partir do coeficiente de fluência  $K_f$  obtido em ensaios básicos. Dos deslocamentos por fluência é possível formar-se uma idéia sobre a perda de carga com o tempo."

"Entretanto, mudanças no valor do carregamento em tirantes, no campo, dependem não somente de fenômenos reológicos, mas podem também ser originários de movimentos nas peças estruturais nas quais são empregados (movimento das paredes, recalques, etc). Para separar estes dois fatores, as medições nas cabeça de ancoragem devem ser muito acuradas."

"Segundo a experiência obtida nos ensaios realizados, pode-se concluir que uma perda de carga de 6% em tirantes de 20-25 m de comprimento com diâmetro de abertura do furo de execução de 10-15 cm em argilas duras e muito duras e de 12% em argilas rijas a duras são devidas a fenômenos reológicos. Dados publicados anteriormente também situaram-se

próximos aos valores acima. É interessante salientar que geralmente não se verificam perdas de carga para períodos superiores a 2-4 meses. A perda de carga medida em períodos superiores a estes, foram inferiores ao valor calculado utilizando-se o coeficiente de fluência; portanto o valor calculado apresentou-se a favor da segurança."

"Uma parede de estacas escavadas, em Munique na qual se utilizaram tirantes, os bulbos ancorados situaram-se em argila e siltes duros a muito duros, com camadas de areia intercaladas. O último nível de tirantes foi protendido após a conclusão da escavação, verificando-se um deslocamento na parede neste nível de somente 0,2 mm, no sentido contrário ao da escavação. A perda de carga medida nesse nível num período de dois meses foi de 6%, sendo devida principalmente ao deslocamento do bulbo de ancoragem em virtude de fenômenos reológicos."

"Para os demais níveis de ancoragens, por outro lado, aos fenômenos reológicos superpuseram-se incrementos de carga, em virtude do prosseguimento da escavação e do movimento da parede no sentido da escavação, que apresentou-se entre 1-2 mm."

"Não se verificou influência de efeitos reológicos nos 450 tirantes (carga de trabalho 37 ton) empregados na construção da estrutura em balanço do pavilhão Olímpico de Munique. Os bulbos de ancoragem situaram-se em pedregulhos

quaternários e areias terciárias. Meio ano após a protensão um máximo de 3,5 tons de perda de carga foi verificado, sendo estas perdas devidas a recalques da fundação."

## II.3 COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO-TEMPO NOS SOLOS

### II.3.1 INTRODUÇÃO

Os solos exibem comportamento de fluência e relaxação de tensão (o termo fluência, "creep", é utilizado para representar as deformações plásticas e volumétricas dependentes do tempo, controladas pela resistência viscosa da estrutura do solo). A magnitude desses efeitos aumenta com a plasticidade, atividade e teor de umidade do solo, sendo influenciada pelas condições de drenagem; entretanto, a forma de comportamento é essencialmente a mesma para todos os solos (Mitchell<sup>5</sup>).

Neste item apresenta-se uma revisão bibliográfica do fenômeno de fluência nos solos, com vistas à análise do comportamento tempo-deslocamento-tensão a carga constante nos ensaios realizados nos tirantes experimentais.

### II.3.2 FLUÊNCIA NOS SOLOS

Baseados em dados experimentais Singh e Mitchell<sup>6</sup>

propuseram a expressão abaixo para representar o comportamento velocidade de deformação-tempo dos solos a carga constante (fluência):

$$\dot{\epsilon} = A e^{\alpha D} (t_1/t)^m \quad (\text{II.1})$$

onde:

$\dot{\epsilon}$  = velocidade de deformação; %/min

D = tensão-desvio; Kgf/cm<sup>2</sup>

$\alpha$  = coeficiente angular do trecho linear do gráfico velocidade de deformação versus tensão - desvio (ver Figura III.25); cm<sup>2</sup>/Kgf

t = tempo, minutos

t<sub>1</sub> = tempo unitário, minutos

A = velocidade de deformação a t = t<sub>1</sub> e D = 0 (ver Figura II.25, extrapolado); %/min

m = coeficiente angular do gráfico velocidade de deformação versus tempo em escala log x log (ver Figura III.26).

A validade da expressão (II.1) é observada para diversos tipos de solo, amolgados ou não, úmidos ou secos, normalmente consolidados ou preadensados, em ensaios drenados ou não; bem como para materiais diversos (metais, concreto, etc).

A velocidade de deformação de fluência diminui com o tempo a níveis de tensão inferiores aos de ruptura. Depois de longos períodos de ensaio a velocidade de deformação pode quase cessar, continuar indefinidamente, ou eventualmente resultar em ruptura (Singh e Mitchell <sup>7</sup>).

Para uma situação na qual os movimentos de fluência foram detectados, é desejável ter-se a possibilidade de prever se os futuros movimentos de fluência tenderão a cessar, continuar ou acelerar-se, eventualmente levando à ruptura (Singh e Mitchell <sup>7</sup>).

A equação (II.1) tem-se mostrado particularmente conveniente ao estudo do "potencial de fluência". O parâmetro "m" é um fator-chave na definição do potencial de um solo; quanto menor o valor de "m" mais rápidos são os movimentos de fluência. De acordo com ensaios realizados nas argilas de Redwood City ( $m = 0,75$ ), Osaka ( $m = 1$ ) e Sault Ste. Marie ( $m = 1,25$ ) verifica-se que a velocidade de deformação é decrescente com o tempo. Entretanto a velocidade de crescimento é menor quanto menor for o valor de "m". Foi também observado que solos com  $m < 1$  eventualmente atingem a ruptura por fluência sob carregamentos inferiores aos ensaios efetuados às velocidades usuais; os solos com  $m = 1$  parecem manter inalterada a resistência após um período de ensaio de fluência, e os solos com  $m > 1$  tendem a cessar seus deslocamentos com o tempo (Singh e Mitchell <sup>7</sup>).



A relação entre as deformações por fluência e o logaritmo do tempo pode ser linear, ou apresentar-se segundo curvas côncavas ou convexas. A relação linear é comumente utilizada em engenharia como aproximação do fenômeno, por causa da simplicidade de análise. Entretanto não se verifica nenhuma "lei" de comportamento a ditar uma forma ou outra (Mitchell <sup>5</sup>).

A perda de resistência devida à fluência (ruptura por fluência) pode ser explicada em termos dos seguintes comportamentos (Mitchell <sup>5</sup>).

1. "Se uma porção significativa de resistência de um solo é devida à cimentação, e as deformações de fluência ocasionarem ruptura das ligações cimentadas, ter-se-á em consequência perda de resistência."

2. "Na ausência de mudanças químicas ou mineralógicas, a resistência depende das tensões efetivas na ruptura. Se o desenvolvimento de fluência promover mudanças nas tensões efetivas, consequentemente a resistência também será alterada."

3. "Em quase todos os solos o cisalhamento promove mudanças na poro-pressão e consequentemente nas tensões efetivas em condições não drenadas, e no volume e umidade nas deformações drenadas."

4. "Mudanças no teor de umidade promovem mudanças de resistência nos solos."

No caso de perda ou ganho de resistência, em virtude de ensaios de fluência, não se verifica mudança na envolvoria efetiva de ruptura (Mitchell <sup>5</sup>).

Nos solos suscetíveis a perda de resistência sob períodos de fluência, o tempo de ruptura é dependente do nível de tensões.

O comportamento a esse respeito é similar aos de outros materiais nos quais o tempo de ruptura é uma função exponencial negativa do nível de tensões, para tensões inferiores a um certo valor crítico. A tensões inferiores ao valor crítico a ruptura não é atingida mesmo depois de longos períodos (Mitchell <sup>5</sup>).

O comportamento de fluência é significativamente influenciado pelas condições prê-existentes de tensões ao carregamento. Assim, estimativas de grande responsabilidade requerem a duplicação em laboratório das condições de campo (Mitchell <sup>5</sup>).

O comportamento de fluência cresce em importância com a quantidade e atividade da argila existente no solo, além do teor de umidade. Para tensões acima das de prê-adensamento, o efeito cresce com a sensibilidade estrutural.

Embora a velocidade e magnitude de deformações por fluência possam ser pequenas para areias, o comportamento deste material segue o geral apresentado (Mitchell <sup>5</sup>).

#### II.4 NORMA BRASILEIRA (ABNT, P-NB-565), EM ESTÁGIO EXPERIMENTAL, PARA ESTRUTURAS ANCORADAS NO TERRENO E ANCORAGENS INJETADAS NO TERRENO <sup>8</sup>

##### II.4.1 INTRODUÇÃO

É transcrito abaixo o trecho relativo a ensaios de fluência para ancoragens permanentes da ABNT, P-NB-565.

##### II.4.2 ABNT, P-NB-565, ITEM 4.6 (ENSAIO DE FLUÊNCIA PARA ANCORAGENS PERMANENTES)

4.6.1 No caso de ancoragens permanentes deverão ser executados ensaios de fluência para avaliar o desempenho das mesmas com cargas de longa duração.

4.6.2 No caso de poderem ocorrer variações nas cargas das ancoragens de mais de 20% de seu valor médio, devem ser feitos ensaios de fluência com cargas variáveis como de talhado nesta norma.

4.6.3 Os ensaios de fluência devem ser feitos em cada obra, no mínimo em 1 ancoragem, no caso de terrenos não

coesivos, no volume interessado pelo bulbo de ancoragem, e no mínimo em 3 ancoragens, no caso de terrenos coesivos ou duvidosos.

4.6.4 Os ensaios de fluência consistirão em medir os deslocamentos, sob carga constante, das cabeças das ancoragens tracionadas pelo macaco para os seguintes tempos de carregamento:

10 min

20 min

40 min

80 min

A partir de 80 min o ensaio pode ser considerado como terminado desde que o deslocamento entre 40 min e 80 min seja inferior a 5% do deslocamento total no ensaio.

4.6.5 No caso de ancoragens cuja carga de trabalho seja prevista variar menos de 20% da carga média de trabalho, os ensaios de fluência especificados no item 4.6.4 serão realizados para a carga de trabalho e para 1,20 vezes a carga de trabalho.

4.6.6 No caso de ancoragens em que se espera variações da carga de trabalho de 20% ou mais, os ensaios de fluência serão realizados para as seguintes cargas:

a) carga de trabalho máxima.

b) 0,80 vezes a carga de trabalho máxima.

c) novamente a carga de trabalho máxima.

Se o deslocamento na prova c for igual ou maior do que na a o ensaio será repetido em tantas séries de carga de trabalho e 0,8 vezes a carga de trabalho até que em um conjunto de ensaios a deformação em c seja menor do que em a.

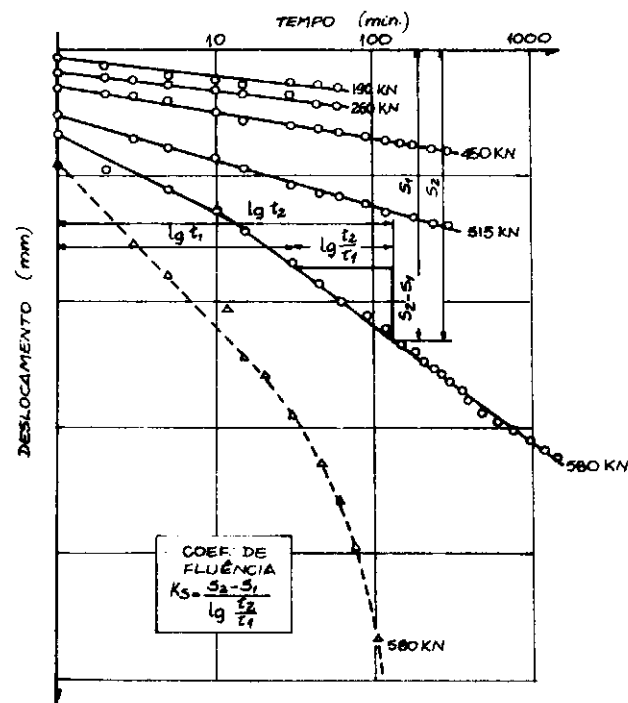
4.6.7 Nas ancoragens permanentes não devem ser utilizadas as cargas de trabalho em que o fator de fluência  $\chi$ :

$$\chi = \frac{\Delta d}{\log \frac{t_2}{t_1}}$$

em que  $\Delta d$  é a variação de deslocamento que corresponde ao intervalo de tempo de  $t_1 = 40$  min e  $t_2 = 80$  min, para 1,5 vezes essa carga de trabalho, seja maior do que:

para terrenos não coesivos  $\chi = 1\text{mm}$

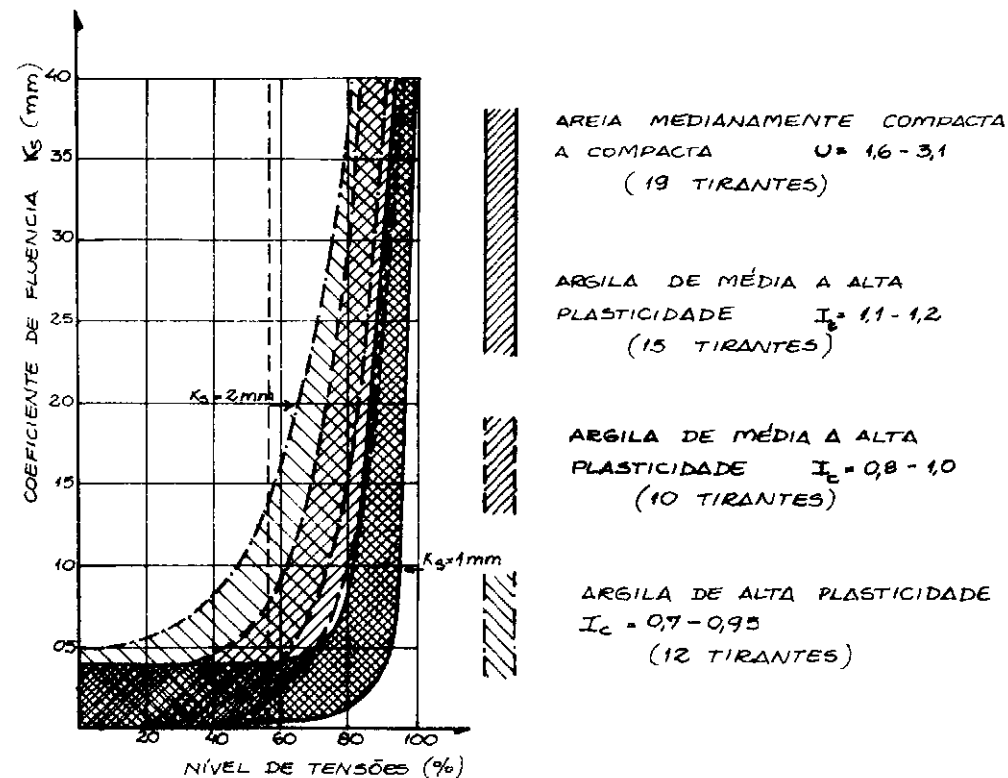
para terrenos coesivos  $\chi = 2\text{mm}$ .



o TIRANTE W h 8  
 Δ TIRANTE W h 7

H. OSTERMAYER

FIG. II-1 GRÁFICO TEMPO-DESLOCAMENTO



H. OSTERMAYER

FIG. II-2 COEFICIENTE DE FLUÊNCIA — NÍVEL DE TENSÕES

### CAPÍTULO III

#### TIRANTES EXPERIMENTAIS

##### III.1 GENERALIDADES

Dois tipos de tirantes em sentido vertical, foram executados. Um super-armado constando de 8 fios de diâmetro ( $\phi$ ) 8mm de aço CP-135,140, outro menos armado (1  $\phi$  8mm CP-135,140), ambos com pequeno comprimento de trecho ancorado (1,5 metros) em solo sedimentar de argila mole orgânica.

A finalidade de adoção de um pequeno valor para o trecho ancorado foi conseguir-se assentá-lo numa região na qual o material envolvente fosse o mais homogêneo possível.

Em ambos os tirantes, por intermédio de um revestimento de PVC de 3" (76mm), conseguiu-se manter completamente desimpedido o trecho livre. Desta forma, o bulbo de ancoragem foi o único responsável pela reação ao carregamento (Figura III.1).

Visou-se com o tirante do primeiro tipo (super-armado), denominado tipo I, conseguir-se uma distribuição de tensões cisalhantes mais uniforme ao longo do fuste de ancoragem, pois, devido à grande rigidez promovida pela super-armação, tem-se praticamente iguais os deslocamentos no topo e base quando em carregamento (ver Seção III.3).

Com os tirantes do segundo tipo, denominados tipo II, pretendia-se um comportamento mais de acordo com os normalmente verificados em tirantes comuns, cujo deslocamento no topo e base diferem quando em carregamento, resultando em vista disto uma distribuição mais desuniforme de tensões ao longo do trecho ancorado.

Procurou-se conferir a ambos os tipos de tirantes fustes de ancoragem idênticos e regulares, de forma cilindrica, tendo altura e diâmetros conhecidos. Visava-se assim facilitar o estudo teórico.

## III.2 CARACTERÍSTICAS DO DEPÓSITO ARGILOSO

### III.2.1 INTRODUÇÃO

Foram feitos por Vilela <sup>9</sup> ensaios em amostras informadas do tipo shelby retiradas de área bem próxima ao local dos testes (Figura III.2) nas imediações da estação Uruguaiana da linha-1 do Metrô. Do resultado destas sondagens



e de outras realizadas pela Tecnosolo no local traçou-se o perfil da camada no local (Figura III.3).

Todos os resultados e conclusões apresentados neste item sobre estes ensaios de laboratório, são condensados de parte da dissertação de Tese de Mestrado de Vilela <sup>9</sup>.

### III.2.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

São apresentados na Figura III.4 os resultados do cálculo de peso específico aparente úmido em função da profundidade. Na faixa argilosa obteve-se em  $\gamma_{nat} = 1,60t/m^3$  e no trecho arenoso  $\gamma_{nat} = 1,90t/m^3$ .

Determinou-se a densidade real dos grãos a diversas profundidades (Figura III.5), bem como foi feita a análise granulométrica (Figura III.6) e determinação do teor de matéria orgânica (Figura III.7).

Resultados de ensaios de limites de consistência (limites de liquidez e plasticidade) e umidade natural com a profundidade são apresentados na Figura III.8, bem como alguns valores da atividade coloidal (Figura III.9). Alguns pontos obtidos situaram-se dentro da faixa  $0,75 < AC < 1,25$  sendo assim segundo classificação de Skempton, uma "argila normal"; outros apresentaram valores superiores a 1,25 sendo portanto uma "argila ativa", valores que aproximam-se mui

to dos obtidos por Mello, conforme cita Vilela <sup>9</sup>, para a argila de Santos.

Plotados os resultados dos limites de Aterberg a diversas profundidades no Gráfico de Plasticidade (Figura III.10) verificou-se que estes pontos situavam-se sob uma mesma direção paralela à linha A de Casagrande.

Segundo Mello, conforme é apresentado por Vilela <sup>9</sup>, isto indica tratar-se o estrato em questão de um solo de mesma origem, diferindo somente na porcentagem de argila a cada profundidade.

### III.2.3 ENSAIOS TRIAXIAIS

#### III.2.3.1 Ensaio Triaxiais Não-Adensados Não-Drenados (UU)

Os ensaios foram efetuados num equipamento de deformação controlada de fabricação Wykeham Farrance, com velocidade de deformação específica de 0,4%/min.

Os corpos de prova foram submetidos a pressões confinantes com finalidade de reproduzir as condições do campo (até 2 Kgf/cm<sup>2</sup>), como também com valores superiores, com finalidade de estudo da sua influência na resistência não-drenada  $S_u$ .

Após a realização do ensaio na amostra indeformada esvaziou-se a célula triaxial, moldando-se novamente a a amostra reconstituindo a forma cilíndrica inicial com diâmetros e alturas médias, obtendo-se assim uma amostra amolgada. Convém salientar, que a membrana de borracha não era retirada da amostra durante o amolgamento, evitando-se assim perda de umidade, segundo processo recomendado por Mitchell, conforme apresenta Vilela <sup>9</sup>.

As Figuras III.11 a III.15 apresentam os resultados das curvas tensão-deformação obtidas em corpos de prova de 2" de diâmetro e relação altura/diâmetro igual ou superior a 2,0.

As amostras mais representativas apresentaram uma deformação específica na ruptura  $E_{rup}$  inferior a 5%.

Na Figura III.16 plotaram-se em função da profundidade os resultados de resistência não-drenada  $S_u$  obtida pela expressão:

$$S_u = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}}{2} \quad (III.1)$$

$\sigma_1$  = tensão principal maior, vertical

$\sigma_3$  = tensão principal menor, horizontal

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  = máxima diferença entre as tensões principais.

Para a argila em estudo, os valores da sensibilidade (S)<sup>\*</sup> estão entre 1 e 3 e são apresentados com a profundidade na Figura III.17. Mello, segundo Vilela<sup>9</sup>, encontrou para as argilas de S.Paulo S=2 e para as de Santos S=4.

Os valores dos módulos tensão-deformação não-drenados<sup>\*\*</sup> encontram-se plotados em função da profundidade na Figura III.19.

### III.2.3.2 Ensaio Triaxiais Adensados Isotropicamente Não-Drenados com Medição de Pressão Neutra (CIU)

Com a finalidade de boa uniformidade de pressões neutras ao longo do corpo de prova foram adotadas as velocidades de deformação específica de 0,02 mm/min para os corpos de prova de 2" (51mm) de diâmetro e de 0,08 mm/min para os de 1,4" (36mm), segundo considerações que são apresentadas pelo autor dos ensaios em sua tese.

---


$$* \text{ Sensibilidade} = \frac{S_u \text{ indeformado}}{S_u \text{ amolgado}}$$

**\*\*** Módulo tensão-deformação não-drenado - módulo secante a nível de tensões de  $0,5 \sigma_{\max}$  representado na Figura III.18.

É apresentado na Figura III.20 o resultado desses ensaios onde plotou-se a variação da coesão efetiva ( $c'$ ) e o ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) com a profundidade, obtidos pelo critério  $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ .

### III.2.3.3 Relação Tensão-Deformação-Tempo

Para a realização dos ensaios de fluência foi utilizada uma amostra extraída a 15,0 m de profundidade, na qual tem-se um solo com teor de argila igual a 25%, umidade natural  $w = 65,5\%$ ,  $LL = 87\%$  e  $IP = 48,5\%$ . Esta amostra foi considerada a mais representativa da camada de argila mole existente na rua Uruguaiana.

Os ensaios de fluência foram efetuados em equipamento triaxial, em estágios de 24 horas, obtendo-se assim o processo denominado de "Stage Creep-Test" (Mitchell<sup>9</sup>).

O resultado dos ensaios com estágios de fluência não-drenados estão apresentados na Figura III.21. As curvas tensão-deformação mostram as deformações instantâneas dos corpos-de-prova devidas à aplicação da tensão-desvio especificada.

As Figuras III.22 à III.24 apresentam a variação com o logaritmo do tempo das deformações específicas axiais  $\epsilon_1\%$  sofridas pelos corpos-de-prova desde o instante que pre

cedem a aplicação das cargas, cada estágio de fluência teve a duração de 24 horas.

A Figura III.25 reúne os resultados de todos os estágios de fluência, num gráfico log-log, da velocidade de deformação ( $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$ ) pelo tempo transcorrido ( $t$ ).

O valor  $m$  é constante para um dado solo mas varia de solo para solo, segundo Singh e Mitchell <sup>7</sup> de 0,4 a 1,3; o valor encontrado para a argila mole da rua Uruguaia na foi  $m = 0,9$ .

Para os parâmetros de fluência,  $A$  e  $\alpha$ , definidos como mostrado na Figura III.26, em que  $A$  é o valor de  $\dot{\epsilon}$  extrapolado da curva  $\log \dot{\epsilon} \times D$  para  $t = t_1 = 1$  minuto e  $D = 0$ , obtiveram-se respectivamente os seguintes valores:

$$\alpha = 2,46 \text{ cm}^2/\text{Kgf} \quad \text{e} \quad A = 9,8 \times 10^3 \text{ \%/min.}$$

### III.3 CARACTERÍSTICA ESTRUTURAL DOS TIRANTES QUANTO À DEFORMAÇÃO DO BULBO ANCORADO

#### III.3.1 INTRODUÇÃO

É sabido que a distribuição de tensões ao longo do fuste de um tirante não é uniforme, variando ao longo de seu comprimento.

Schmid e Prieto <sup>10</sup>, utilizaram um modelo matemático estabelecido por Sallas e Belzunce, para a distribuição de tensões ao longo do fuste de uma estaca, adaptando-o para o caso de ancoragem em terra. O modelo de Sallas e Belzunce considera uma série de cargas pontuais ao longo da linha da estaca, no interior de um semi-espço elástico ideal, além da hipótese de igual deslocamento destes pontos durante o carregamento, isto é, da rigidez absoluta do fuste da estaca em relação ao solo circundante.

Um modelo experimental fotoelástico, realizado por Schmid e Prieto, de acordo com as hipóteses acima, apresentou boa concordância com a distribuição proposta pelo modelo matemático.

Segundo os resultados obtidos, a distribuição do carregamento ao longo do fuste do bulbo de tirantes rígidos é crescente no sentido do deslocamento, sendo de pequeno valor o acréscimo ao longo do seu comprimento, a menos das extremidades (Figura III.27).

Adams e Klym <sup>11</sup> apresentam o resultado de instrumentação com "strain-gages" de um tirante em "till" (solo de origem glacial) compacto; Figura III.28, no qual verifica-se a distribuição desuniforme de carregamento ao longo do fuste de ancoragem. Também neste trabalho fica salientado o processo da propagação gradativa de tensões, que localizam-se inicialmente a pequenos carregamentos no topo do tirante,

e com o acréscimo do carregamento vão se propagando para regiões inferiores.

Analisando-se os resultados acima, fica salientado que os tirantes usuais, como o instrumentado por Adams e Klym, não se comportam como um elemento rígido com relação ao solo circundante, tendo o deslocamento resultante do alongamento do bulbo sob carregamento uma contribuição significativa no deslocamento total (o deslocamento devido ao alongamento tem importância crescente com a proximidade do topo do tirante).

Foi deduzida uma expressão (ver Apêndice 1) para o desenvolvimento das tensões cisalhantes ao longo do fuste de ancoragem para tirantes que trabalhem com o bulbo tracionado, levando-se em consideração a deformabilidade do mesmo, tendo como hipóteses simplificadoras a linearidade e constância do comportamento tensão-deformação do meio envolvente ao tirante, apresentando-se esta expressão da seguinte forma:

$$\tau(x) = C_0 \cosh(\alpha x) + C_2 \sinh(\alpha x) \quad (\text{III.2})$$

(expressão 1.18 Apêndice)

onde:

$$\alpha = \sqrt{M_s \pi D / E_a A_e}$$

$$C_0 = \frac{Q \alpha + \pi D C_2 (1 - \cosh(\alpha l))}{\pi D \sinh(\alpha l)} ; \quad (\text{FL}^{-2})$$



$$C_2 = \left( \frac{C_1}{\alpha} - \frac{Q\alpha}{\pi D} \right); \quad (FL^{-2})$$

$$C_1 = Q \, Ms / E_a \, A_e; \quad (FL^{-3})$$

sendo:

$Ms$  = módulo tensão cisalhante-deslocamento;  $(FL^{-3})$

$D$  = diâmetro do bulbo;  $(L)$

$E_a$  = módulo de elasticidade do material dos cabos de atirantamento;  $(FL^{-2})$

$A_e$  = área equivalente do bulbo de ancoragem (definida item 1.5 Apêndice 1);  $(L^2)$

$Q$  = carregamento;  $(F)$

$\ell$  = comprimento do bulbo de ancoragem;  $(L)$

$\tau(x)$  = tensão cisalhante atuante num ponto do bulbo de ancoragem situado a uma distância  $(x)$  da extremidade inferior do mesmo;  $(FL^{-2})$ .

Utilizando-se a expressão (III.2), verificou-se que o segundo termo  $C_2 \sinh(\alpha x)$  apresenta-se nos casos usuais pouco significativo. Nestas condições, a expressão resume-se a:

$$\tau(x) = C_0 \cosh(\alpha x) \quad (III.3)$$

(expressão 1.18a Apêndice 1)

De acordo com a expressão (III.3), verifica-se que a "distribuição específica de tensões" (DT) definida da forma:

$$DT = \tau'(\ell) D \ell / Q \pi$$

Sendo:

$$\tau'(\ell) = d \tau(x) / dx \quad \text{para} \quad x = \ell, \text{ DT } \bar{e} \text{ igual a:}$$

$$DT = \{ \alpha C'_0 \sinh(\alpha \ell) \} (1/\pi) \quad (\text{III.4})$$

sendo:

$$C'_0 = \frac{\alpha D \ell + \pi \ell C'_2 \{1 - \cosh(\alpha \ell)\}}{\pi D \sinh(\alpha \ell)}$$

$$C'_2 = \left( \frac{D \ell M_s}{E_a A_e \alpha} - \frac{\ell \alpha}{\pi} \right)$$

Como a constante  $C'_2$  também é pouco significativa no cálculo  $C'_0$  desprezando-se-a a equação (III.4) da "distribuição específica de tensões" (DT) passa a:

$$DT = \alpha^2 \ell ; (L^{-1}) \quad (\text{III.5})$$

Acredita-se que a distribuição específica de ten

sões é um índice representativo da alongabilidade de tirantes de bulbo tracionado.

Analisando a expressão (III.5) conclui-se que a "distribuição específica de tensões" (DT) está relacionada:

- diretamente com o comprimento do bulbo ancorado;
- diretamente com o módulo tensão cisalhante-deslocamento ( $M_s$ );
- diretamente com o diâmetro do bulbo ancorado ( $D$ );
- inversamente o módulo de elasticidade dos cabos de atirantamento;
- inversamente com a área equivalente do bulbo ancorado.

Convém salientar que a validade da hipótese da rigidez absoluta com relação ao solo circundante, hipótese adotada por Schmid e Prieto, será tanto mais válida quanto menor for o valor da "distribuição de tensões" (DT). Para tirantes usuais, como o instrumentado por Adams e Klym, o valor da "distribuição específica de tensões" (DT) é mais elevado, sendo portanto bastante desuniforme a distribuição de tensões ao longo do fuste. Nestas condições é irreal um cálculo da distribuição de tensões considerando-se a hipótese da rigidez absoluta.

Na Figura III.29 encontra-se a distribuição de tensões cisalhantes atuantes no fuste de um tirante hipotético de bulbo tracionado, em areia, calculado segundo a expressão (III.2). O cálculo desta distribuição é apresentado no Apêndice.

Trata-se de um tirante de cabo com as seguintes especificações hipotéticas:

- Carga de trabalho ( $Q$ ) = 30.000 Kg
- Seção de aço ( $A_a$ ) = 10 cm<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidade do aço ( $E_a$ ) =  
=  $2,1 \times 10^6$  Kgf/cm<sup>2</sup>
- Tensão de ruptura do aço (CA-50A) = 5500 Kgf/cm<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidade da argamassa de injeção ( $E_m$ ) =  $2,1 \times 10^5$  Kgf/cm<sup>2</sup>
- Resistência a tração da argamassa ( $\sigma_{Tm}$ ) =  
= 30 Kgf/cm<sup>2</sup>
- Diâmetro do bulbo de ancoragem ( $D$ ) = 10 cm
- Comprimento de ancoragem ( $\ell$ ) = 10 m
- Módulo tensão cisalhante-deslocamento ( $M_s$ ) =  
= 3 Kgf/cm<sup>3</sup>.

O valor calculado para a tensão cisalhante no topo do bulbo ancorado  $\tau(\ell)$  apresentou-se igual a 2,1 Kgf/cm<sup>2</sup>, enquanto na base  $\tau(0)$  foi de 0,47 Kgf/cm<sup>2</sup>, sendo o valor da

"distribuição específica de tensões" igual a  $DT = 0,441 \text{ m}^{-1}$ .

### III.3.2 CARACTERÍSTICA ESTRUTURAL DOS TIRANTES UTILIZADOS NA PESQUISA

Dois tipos de tirantes foram utilizados na pesquisa. Um foi dimensionado de tal forma a poder-se considerar o seu comportamento com relação ao solo circunvizinho mais de acordo com a hipótese da rigidez absoluta, outro com característica de comportamento dos tirantes usuais, dimensionado de forma que a estimativa do valor da distribuição específica de tensões fosse similar à do tirante em areia, do exemplo citado.

Os tirantes acima citados tiveram as seguintes características:

#### TIPO I - RÍGIDO

diâmetro do bulbo - 11,5 cm

comprimento do bulbo - 1,5 m

seção de ferro - 4 cm<sup>2</sup>

tipo de aço - CP 140-135

fator água-cimento da argamassa utilizada - 0,5.

#### TIPO II - FLEXÍVEL

diâmetro do bulbo - 11,5 cm

comprimento do bulbo - 1,5 m

seção de ferro -  $0,5 \text{ cm}^2$

tipo de aço - CP 140-135

fator água-cimento da argamassa utilizada - 0,5.

Nas Figuras III.30 e III.31, respectivamente, encontra-se representada a distribuição das tensões cisalhantes atuantes no fuste dos tirantes tipos I e II, para um carregamento de 1000 Kgf, conforme cálculo realizado no Apêndice 2.

Para a estimativa admitiu-se o módulo tensão cisalhante-deslocamento ( $M_s$ ) igual a  $1,28 \text{ Kgf/cm}^3$ , obtido no ensaio do tirante S-5 tipo I (a ser apresentado no item 5.2).

Considerou-se para o cálculo da distribuição a apresentada nas Figuras III.30 e III.31 a hipótese da argamasa formadora do bulbo ter-se trincado ao carregamento, passando dessa forma os cabos de atirantamento a serem os unicos responsáveis pela deformabilidade do bulbo. Nestas condições, o valor da distribuição específica de tensões assim determinada é de 0,081 e  $0,657 \text{ m}^{-1}$  para, respectivamente, os tirantes tipos I e II.

Conforme os cálculos realizados no Apêndice 2, para o valor estimado de  $27 \text{ Kgf/cm}^2$  para resistência à tração da argamassa, dificilmente ambos os tirantes apresentariam o comportamento acima apresentado.

Esperava-se ao momento do planejamento dos ensaios, uma maior capacidade de carga para estes tirantes (em torno da correspondente aos resultados dos ensaios UU indeformados, e não dos amolgados como realmente se verificou). Com esta grandeza de carregamento (praticamente o dobro), esperava-se que a partir de certo momento, a carga fosse suficiente para trincar o corpo de argamassa do bulbo, ocasionando aumento da alongabilidade do mesmo, o que no tirante tipo II seria muito significativo.

Acreditava-se que esta mudança de alongabilidade ocasionaria mudança de comportamento tensão-deformação-tempo do tirante, além de modificar sua capacidade de carga.

A distribuição específica de tensões para os tirantes tipos I e II, antes de atingir-se o trincamento seria, de acordo com os valores determinados no Apêndice 2, igual a 0,023 e 0,030  $m^{-1}$ ; portanto, a diferença entre os dois tipos de tirantes seria muito pouco significativa. Em vista destes valores, esperava-se que ambos os tipos de tirantes comportassem-se semelhantemente nos primeiros estágios, passando em determinado momento, com o grande acréscimo de flexibilidade do tirante tipo II, resultante do trincamento, a ter um comportamento diferenciado.

O exposto acima não ocorreu, tendo o tirante tipo II apresentado um comportamento diverso do tirante tipo I desde os primeiros estágios.

Analisando posteriormente os ensaios, levantou-se a hipótese de a resistência à tração da argamassa ter a apresentado valor bastante inferior ao estimado em função do fator água-cimento, 27 Kgf/cm<sup>2</sup>, de modo a provocar o comportamento observado.

Este pequeno valor suposto para a resistência à tração da argamassa seria possivelmente oriundo do adensamento deficiente da mesma. Convém frisar que, como se verá no item III.4, a argamassa foi simplesmente depositada e não a densada. A não aplicação de pressão, como usualmente se procede no atirantamento, pode ter concorrido para a existência de uma elevada porcentagem de ar incorporado, enfraquecendo o material.

#### III.4 EXECUÇÃO

Seis tirantes, em sentido vertical, foram executados, sob a supervisão do autor, pela equipe de sondagens da Tecnosolo S.A., de acordo com o esquema fornecido; três com oito fios, de 8mm (tipo I), três com um único fio de 8mm (tipo II), Figura III.32.

Estes tirantes passam a ser denominados por numeração arábica em ordem crescente, precedida pela letra S, seguindo-se um indicativo de sua característica estrutural, como se vê na Figura III.33. Exemplo: tirante S-1, tipo I.



Trata-se do primeiro dos seis tirantes, e consta de oito fi  
os (tipo I-rígido).

As etapas de execução seguiram o seguinte esque  
ma: (Figura III.34)

- desmonte de laje de concreto magro de 20 cm de espessura (início: profundidade 0,00m); (a)
- escavação manual de aterro de demolição com es p<sub>ess</sub>ura variável (30 cm a 160 cm) (início: pro fundidade 0,20 cm); (a)
- tradagem de areia fina até o nível d'água (têrmi no: profundidade 2,30 m); (b)
- revestimento de 6" (150 mm) até a profundidade de 2,60 metros; (c)
- lavagem direta até a profundidade de 14 metros, trépano de 3" (76 mm) com circulação de bentonita (início: profundidade 2,30 m); (c)
- lavagem direta até a profundidade de 11 metros com trépano de 5" (127 mm) com circulação de bentonita; (d)
- revestimento HX (4" = 102 mm) até 14 metros com circulação de água; (e)
- limpeza do interior do revestimento com barrilete de início com circulação de água, até a pro

fundidade de 14 metros; (f)

- esgotamento da água do interior do revestimento, através de bomba-balde; (g)
- colocação da armadura; (h)
- colocação da pasta de cimento (16,5  $\ell$ ), com fator água-cimento de 0,5; por intermédio de tubo de PVC de 1" (25 mm); (h)
- colocação de revestimento de PVC de 3" (76 mm); (i)
- retirada dos revestimentos HX e de 6"; (i)

Nos tirantes tipo II de um único fio foram utilizados centralizadores de modo a obter-se uma disposição axial do mesmo em relação ao bulbo.

Com o intuito de conseguir-se uma melhor aderência do cabo com a argamassa de cimento, nos tirantes tipo II efetuou-se uma pintura de epoxi na região correspondente ao bulbo, pulverizando-se a seguir areia, e conseguindo-se desta forma uma alta aspereza no local.

Entretanto, devido à rapidez de secagem do elemento epoxi, dificultando conseguir-se desta forma um bom revestimento de areia, passou-se à utilização de "araldite", de maior tempo de trabalhabilidade.

O revestimento de PVC de 3" (76 mm) foi colocado

atravessando toda a camada de areia, penetrando 1 metro no interior da camada argilosa, situando-se a uma distância de 1,4 metros relativamente ao bulbo ancorado. Desta forma pretendia-se que a região do bulbo fundado na camada argilosa fosse a única responsável pela reação aos carregamentos aplicados, Figura III.32.

Durante a execução em um dos tirantes (S-2, tipo II), no momento da remoção do revestimento HX, o tubo de PVC deslocou-se de sua posição correta, fundindo-se numa peça única com a argamassa fresca do bulbo. Daí, em virtude do desmoronamento natural proveniente da retirada do revestimento HX tornou-se impossível promover-se o retorno do tubo PVC à posição original, invalidando-o para a pesquisa.

Posteriormente a época do ensaio, constatou-se ter sido o tirante S-6 tipo II inadequadamente executado (possivelmente não foi realizado o total esgotamento da água do interior do revestimento HX antes da concretagem), pois o tirante rompeu-se com um pequeno carregamento.

O tirante S-3 tipo I, embora não totalmente invalidado para ensaio, apresentou problemas a partir de dado momento, oriundos provavelmente de causas executivas. Acredita-se que estes problemas sejam devidos a um bloqueio parcial causado por um vergalhão de 1" (25 mm) e de 2 metros de comprimento. Este vergalhão foi utilizado para desempedir a passagem do tubo de PVC de 3" (76 mm) no momento da execu

ção do tirante. A passagem encontrava-se bloqueada pelo posicionamento do tubo de 1" (25 mm), utilizado na colocação da nata de cimento formadora do bulbo, que se havia desprendido durante a operação. A passagem do tubo de PVC foi conseguida, mas o vergalhão soltou-se e possivelmente ficou parcialmente incorporado ao bulbo. Durante o ensaio, com o deslocamento do bulbo, possivelmente este vergalhão entrou em contato com o revestimento de PVC passando a opor-se ao movimento livre daquele.

Os demais tirantes (S-1 tipo I, S-4 tipo II e S-5 tipo I) foram satisfatoriamente executados.

Após alguns dias de execução, através de uma haste de sondagem com 1" (25 mm) de diâmetro, ligada a uma bomba de recalque que injetava água sob pressão, verificou-se a cota do topo do bulbo de ancoragem. Conhecidos estes valores e a cota de assentamento dos tirantes (14 metros), determinou-se que o comprimento do bulbo de ancoragem foi de aproximadamente 160 cm. Desta forma como o volume de argamassa foi de 16,5 ℓ, calculou-se que o diâmetro médio do fuste tinha 11,45 cm. (J)

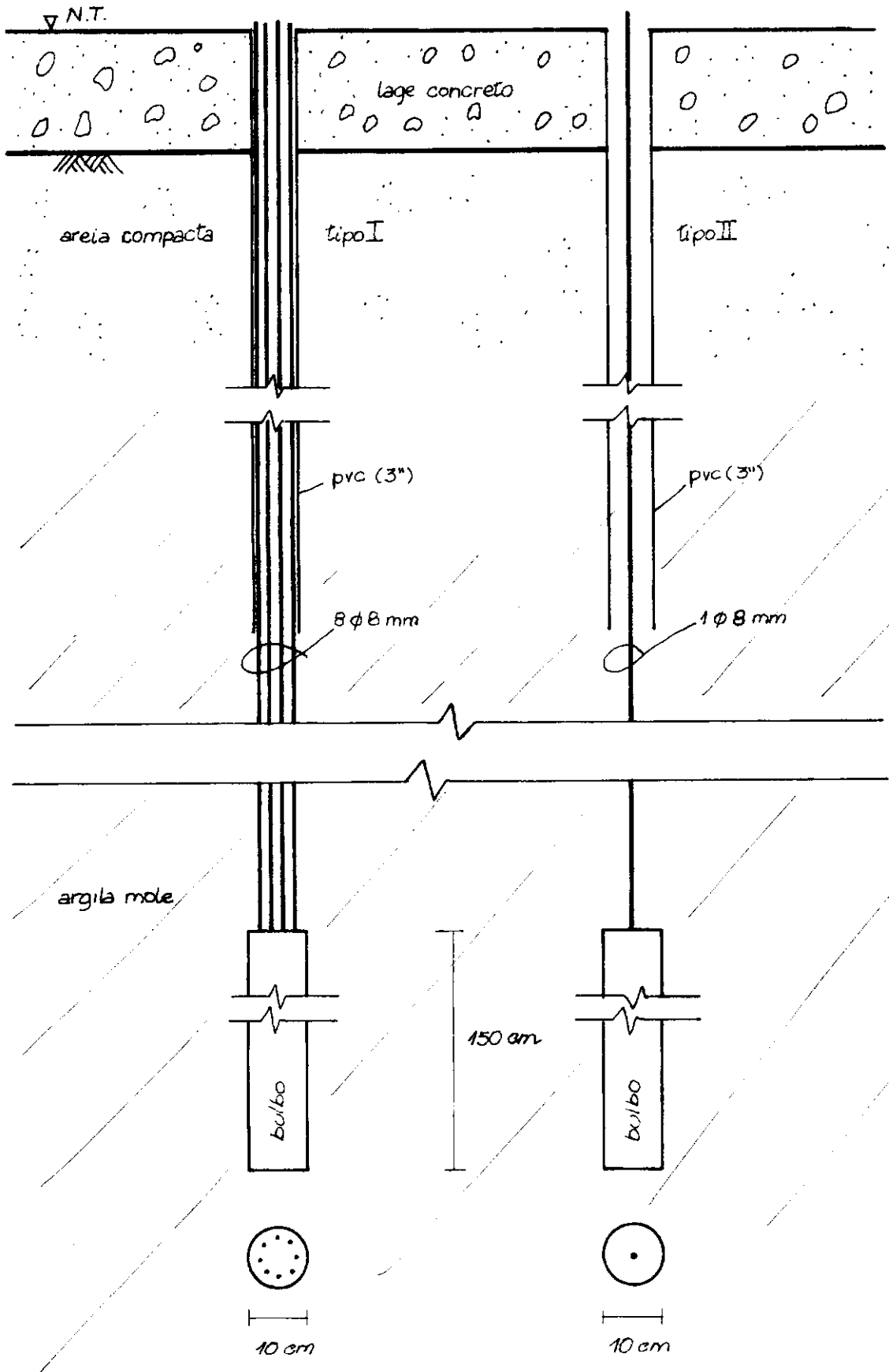
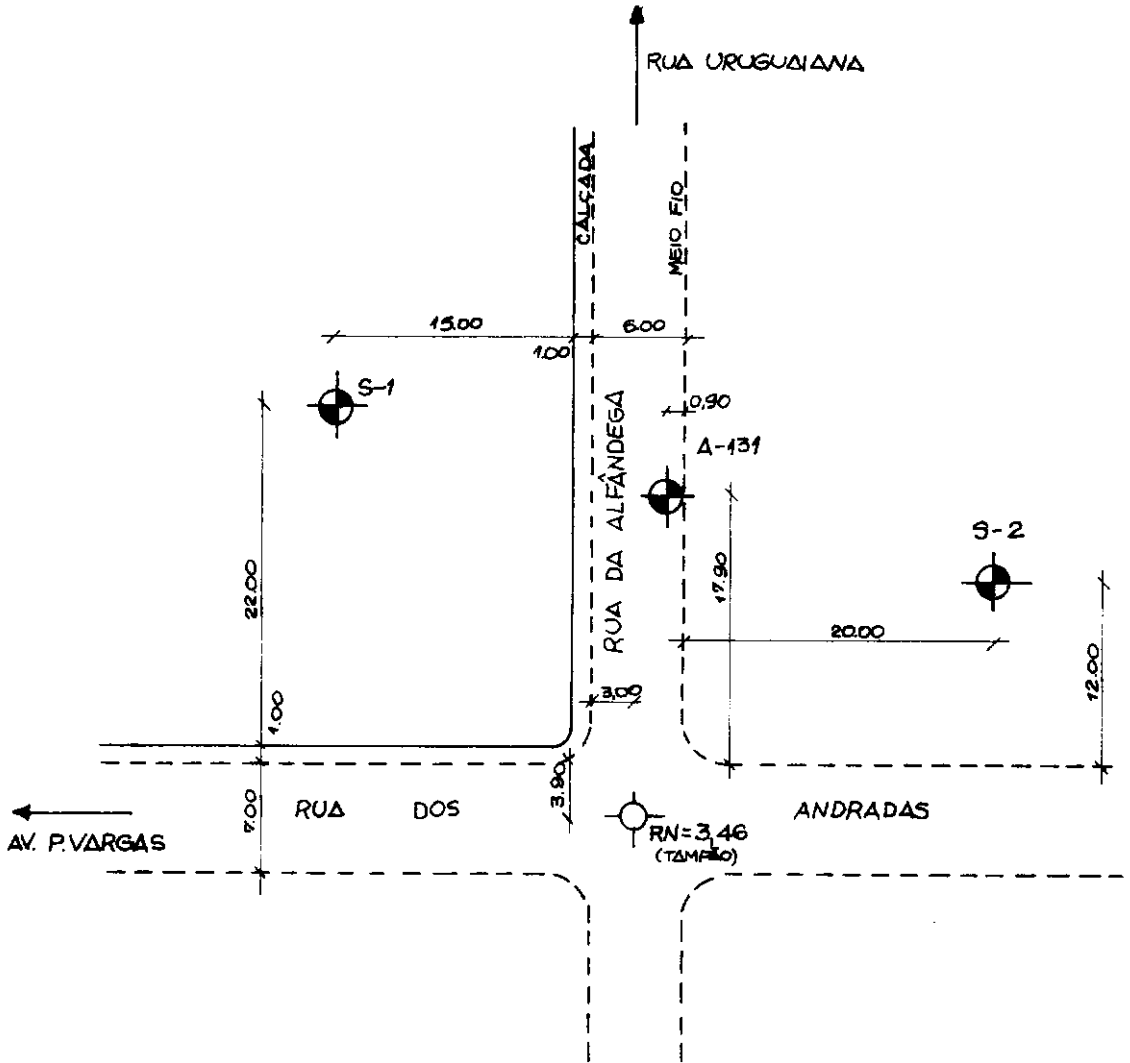


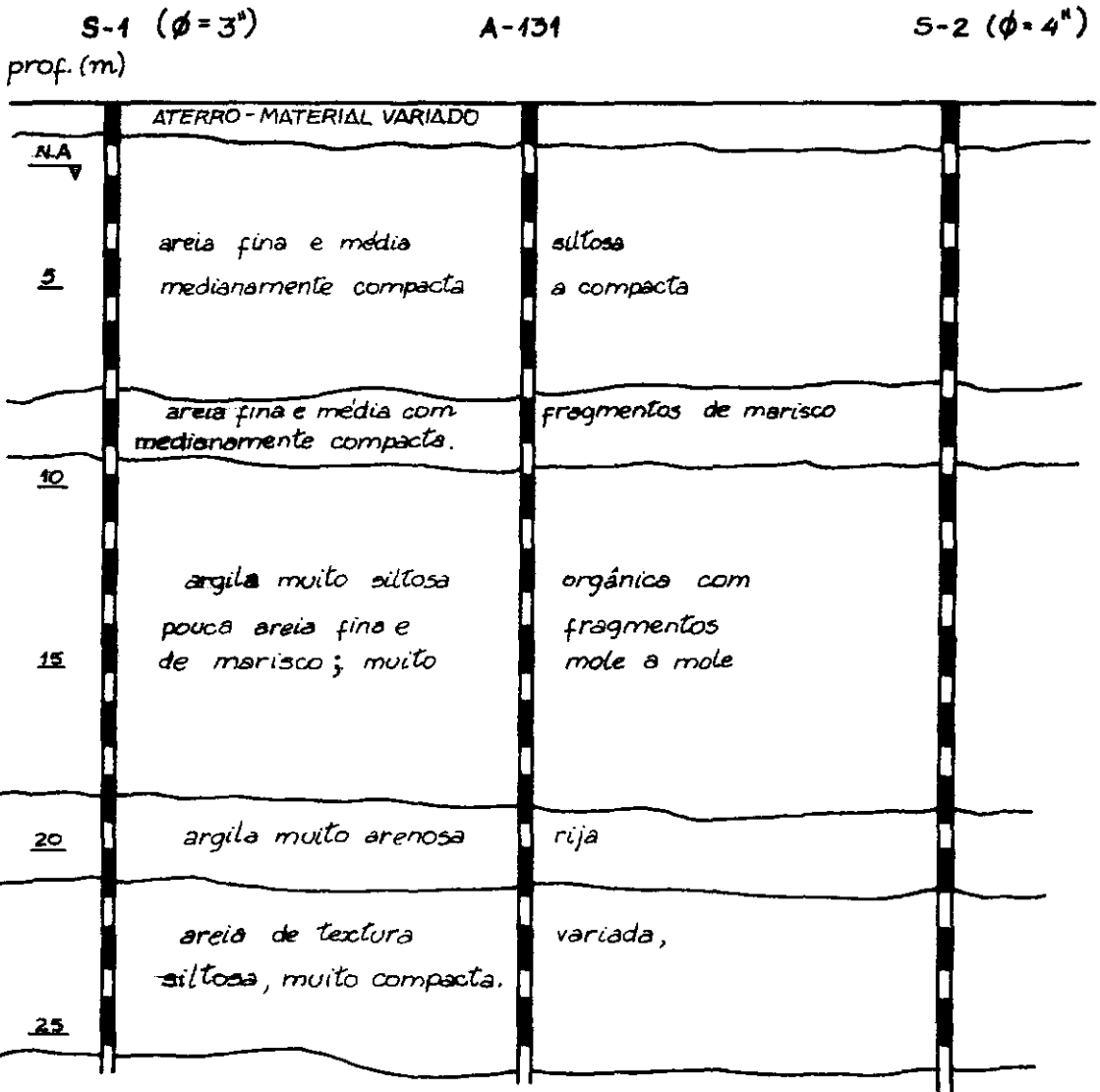
FIG. II.1 TIRANTES EXPERIMENTAIS



E: 1:500

COPPETEC/ET-514/75

FIG. III.2 CROQUIS DE LOCALIZAÇÃO



PERFIL TRANSVERSAL A ESTAÇÃO URUGUAIANA

E.V. 1:200  
E.H. 1:400

COPPETEC/ET-514/75

FIG. III-3

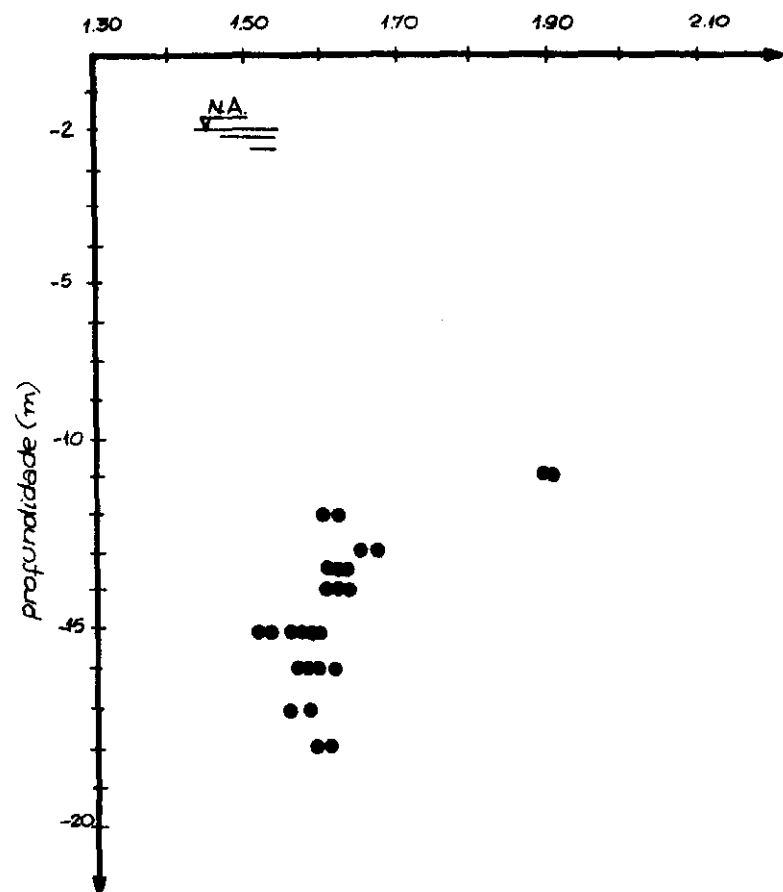


FIG. III-4 PESO ESPECÍFICO NATURAL  
 $\gamma_{nat}$  -  $g/cm^3$

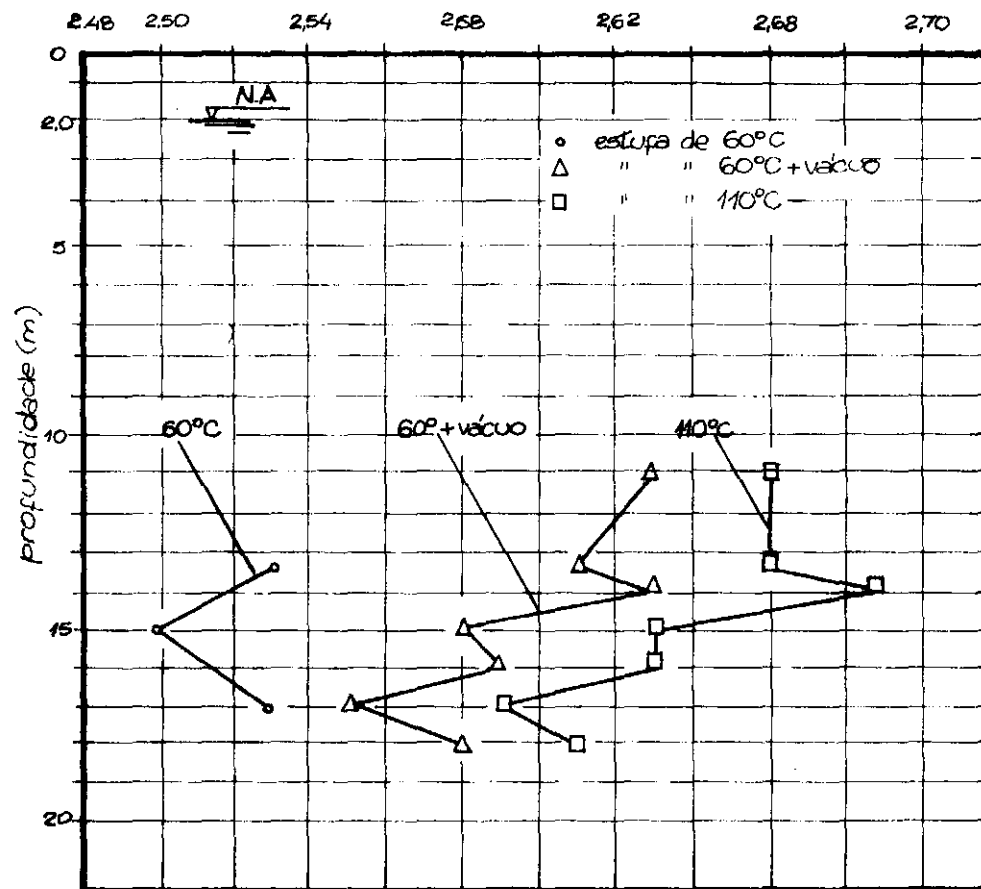
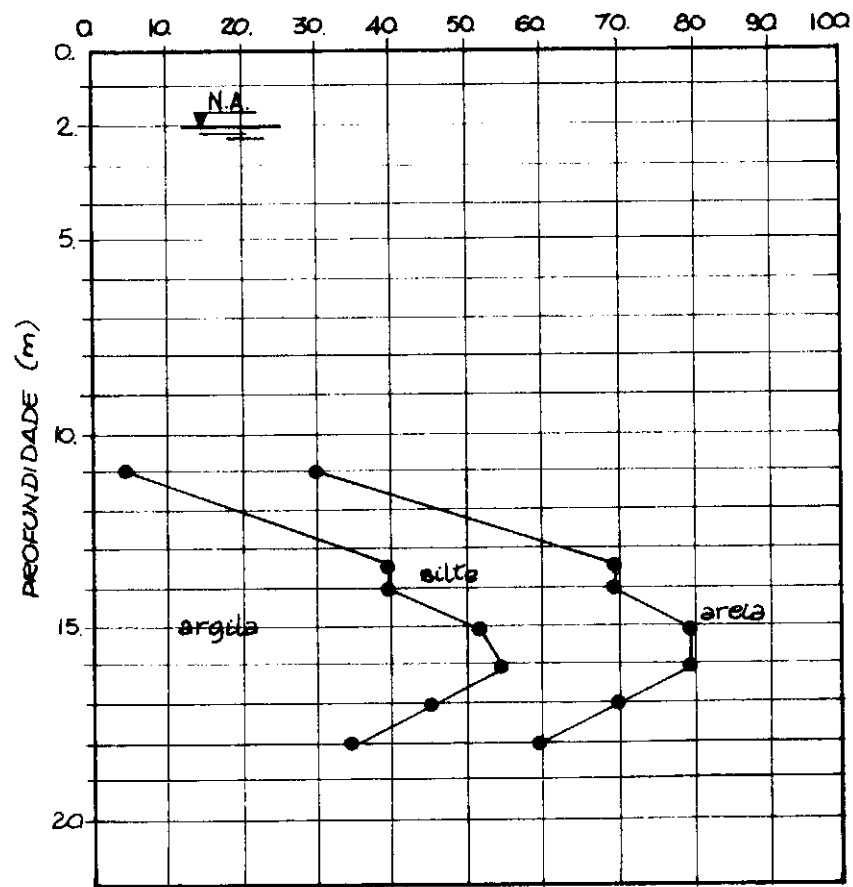


FIG. III-5 PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS  
 $G$  - ( $g/cm^3$ )





COPPETEC/ET-514/75

FIG. III.6 GRANULOMETRIA (%)

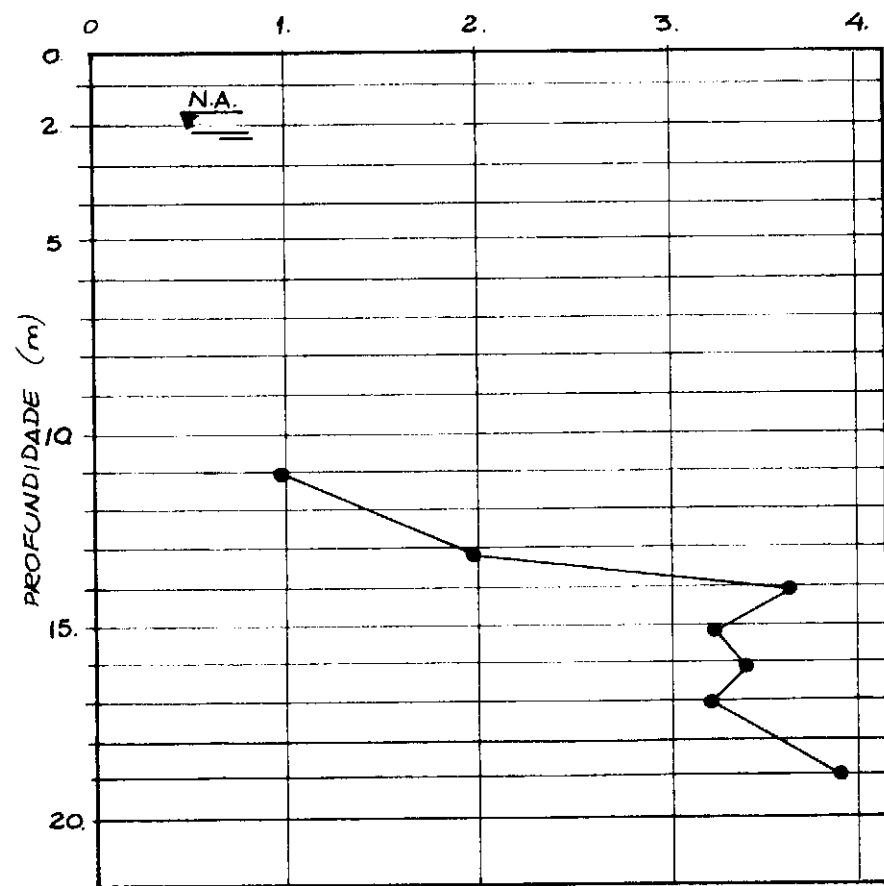


FIG III.7 % MAT. ORGÂNICA (%)

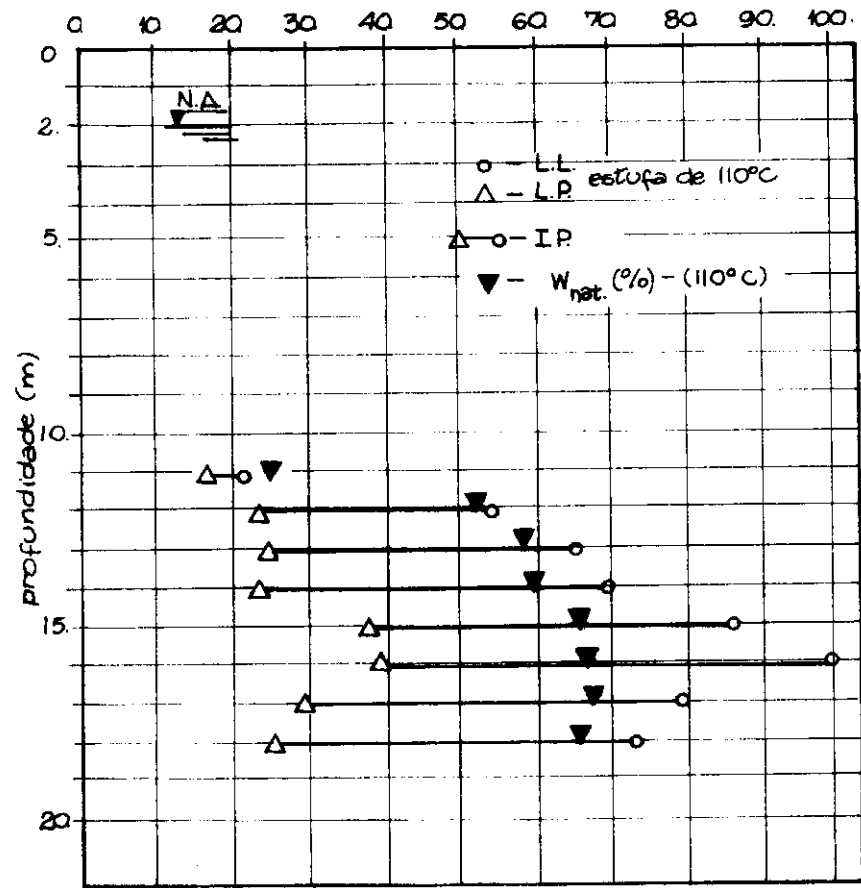


FIG. III.8 UMIDADES (%)

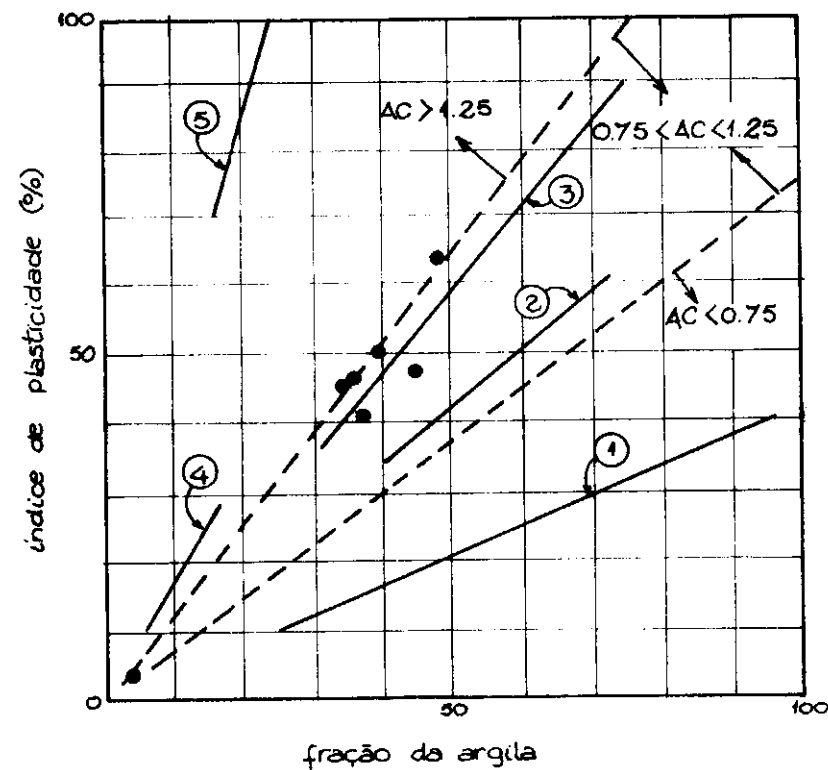


FIG. III.9

- ① argila azul, Boston, USA
- ② argila variegada, S. Paulo
- ③ argila marinha, Santos
- ④ argila marinha, Paraná
- ⑤ argila, México
- argila marinha, Rua Uruguaiana - RJ.

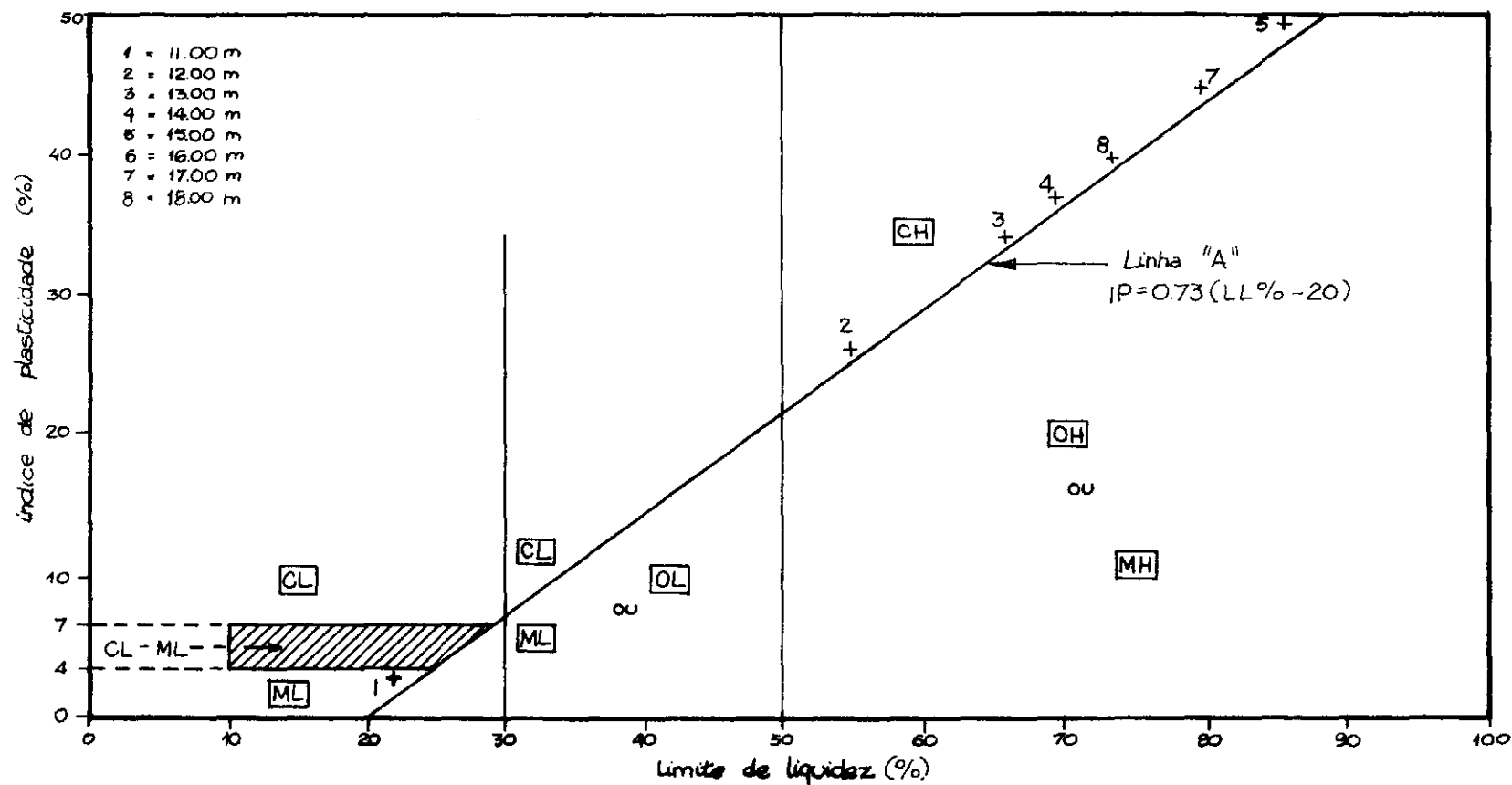


FIG. III-10 GRÁFICO DE PLASTICIDADE

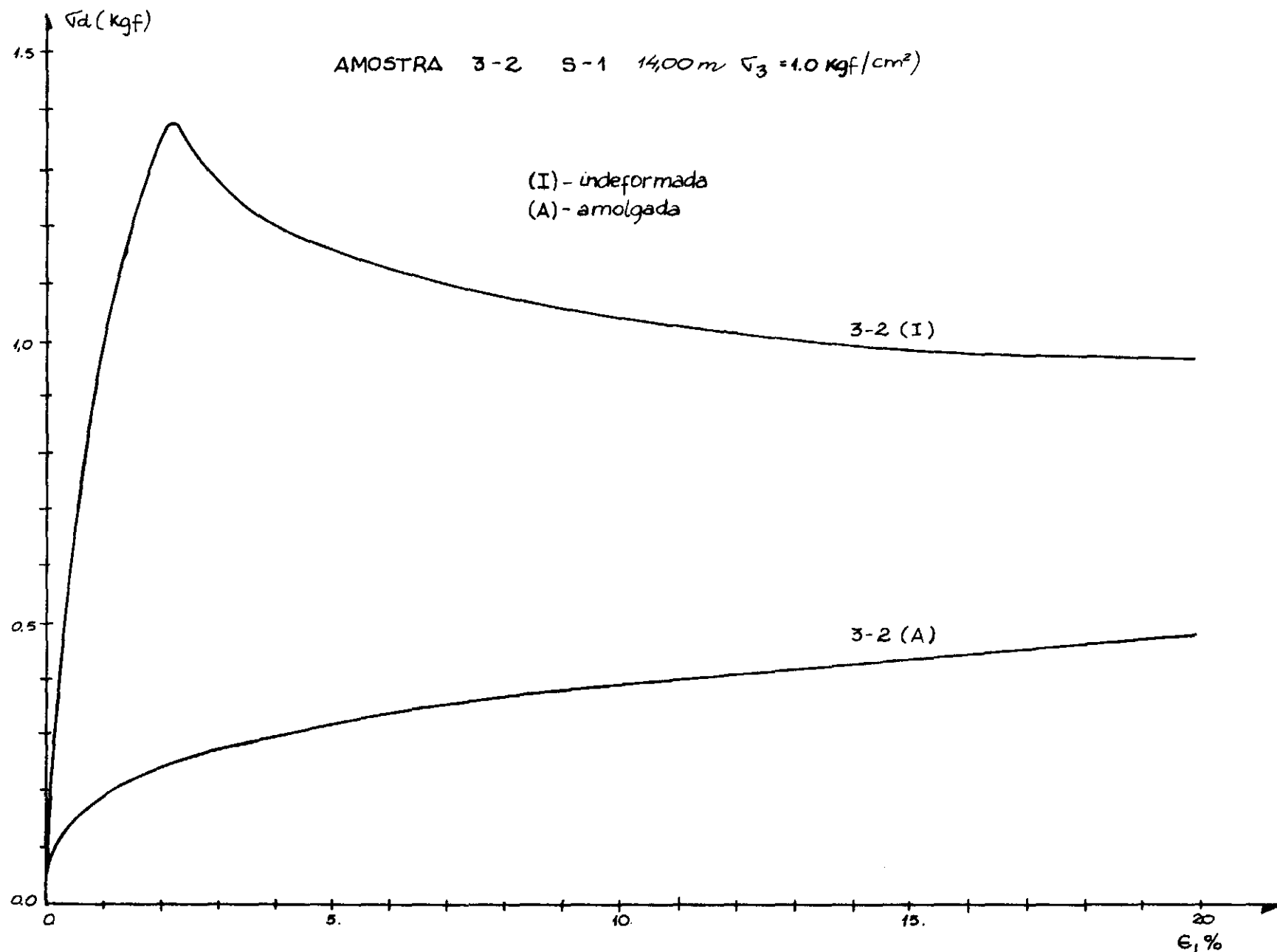


FIG. III.11 ENSAIO TRIAXIAL NÃO-ADENSADO NÃO-DRENADO (UU)

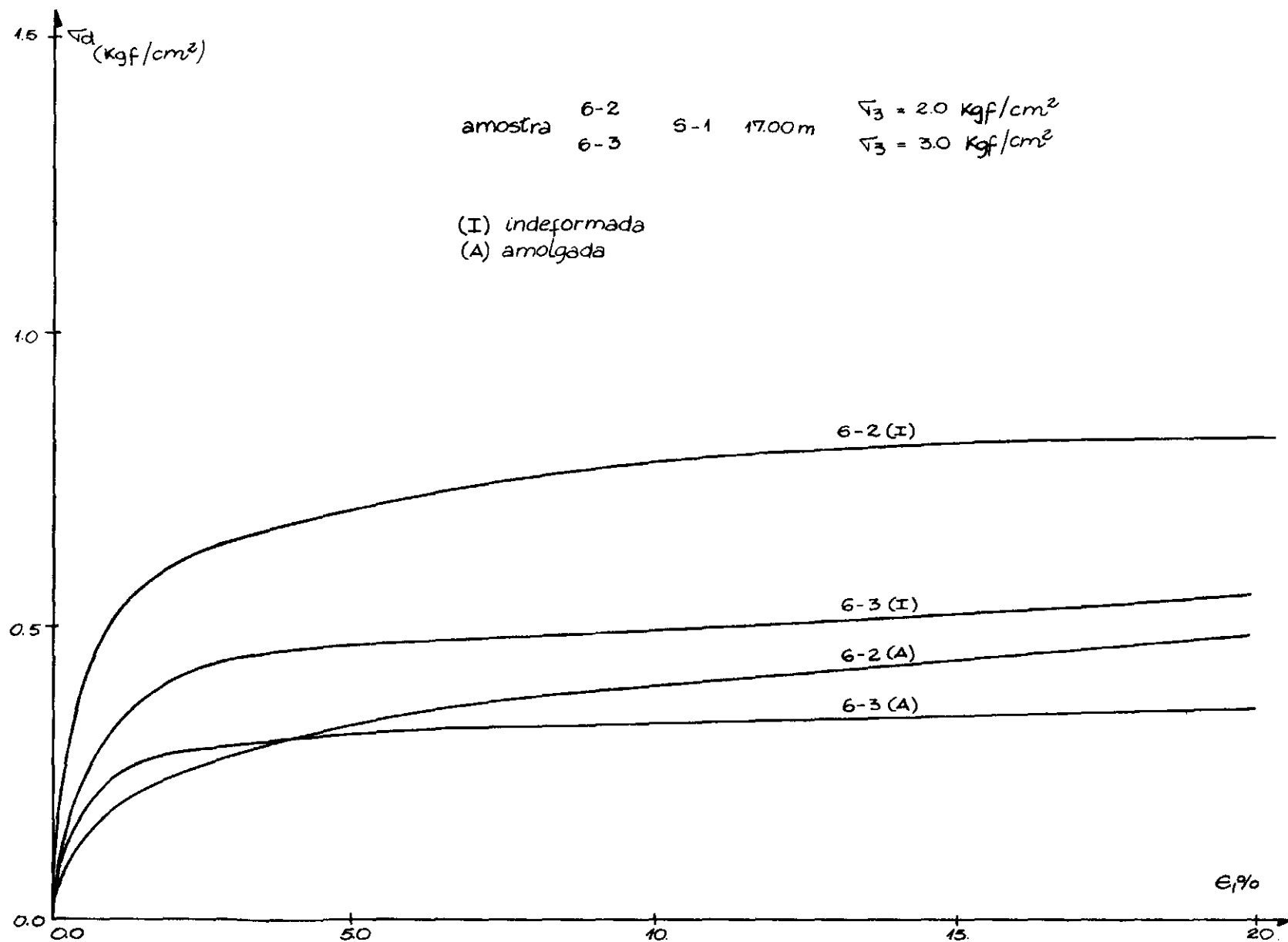


FIG. III. 12. - ENSAIO TRIAXIAL NÃO-ADENSADO NÃO-DRENADO (UU)

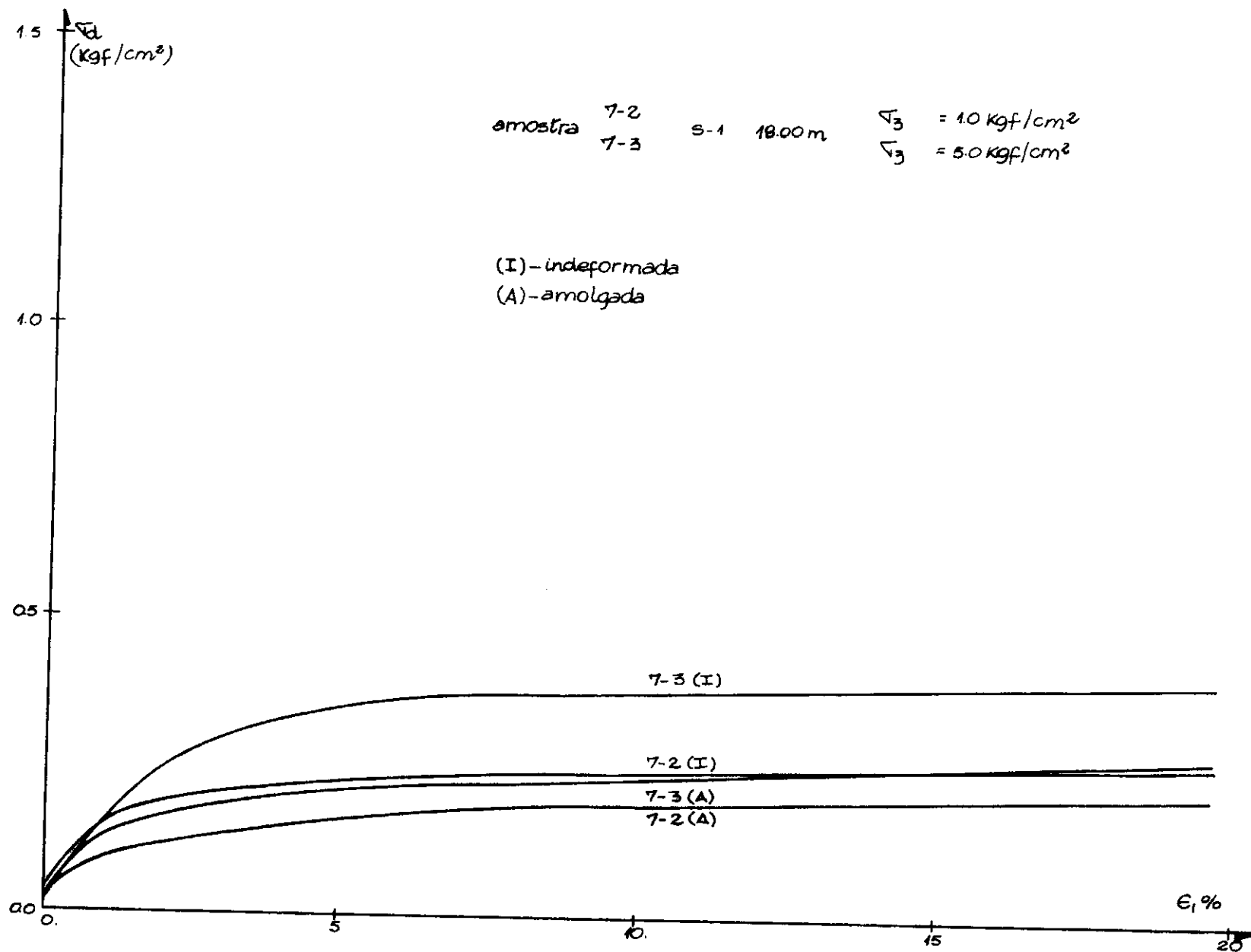


FIG. III. 13 - ENSAIO TRIAXIAL NÃO-ADENSADO NÃO-DRENADO (UU)

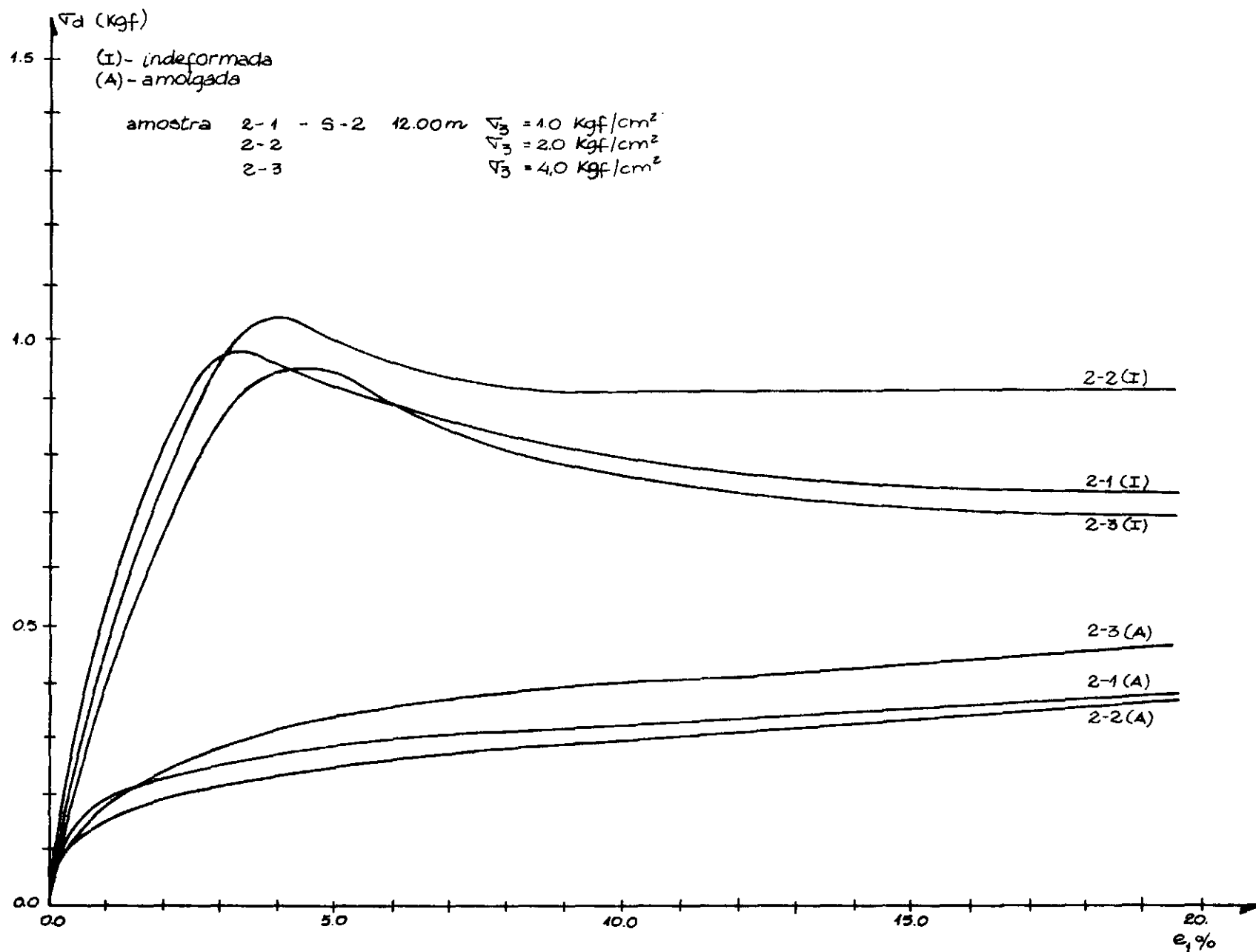


FIG. III - 14 ENSAIO TRIAXIAL NÃO-ADENSADO NÃO-DRENADO (UU)

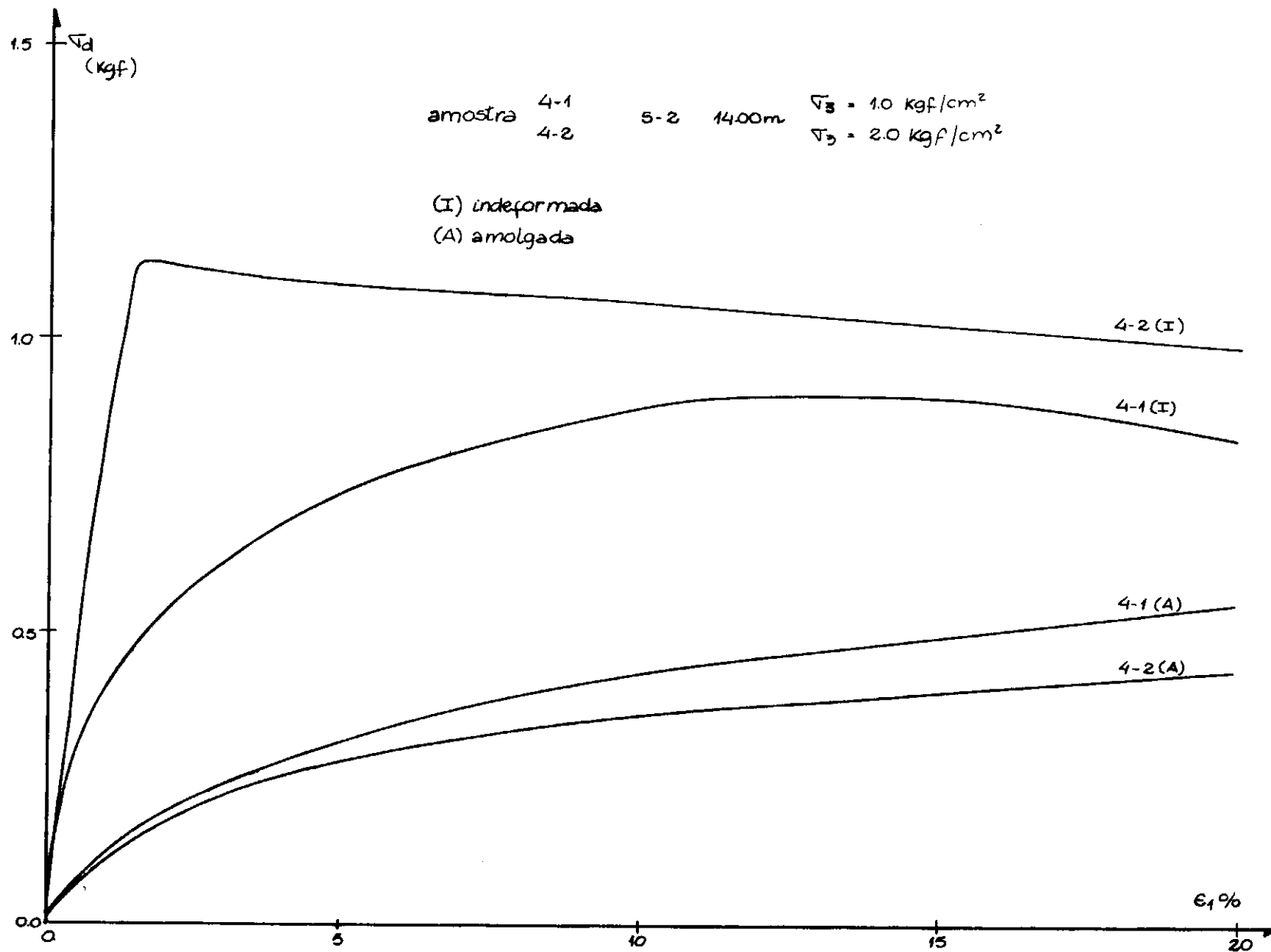


FIG. III. 15 - ENSAIO TRIAXIAL NÃO-ADENSADO NÃO-DRENADO (UU)



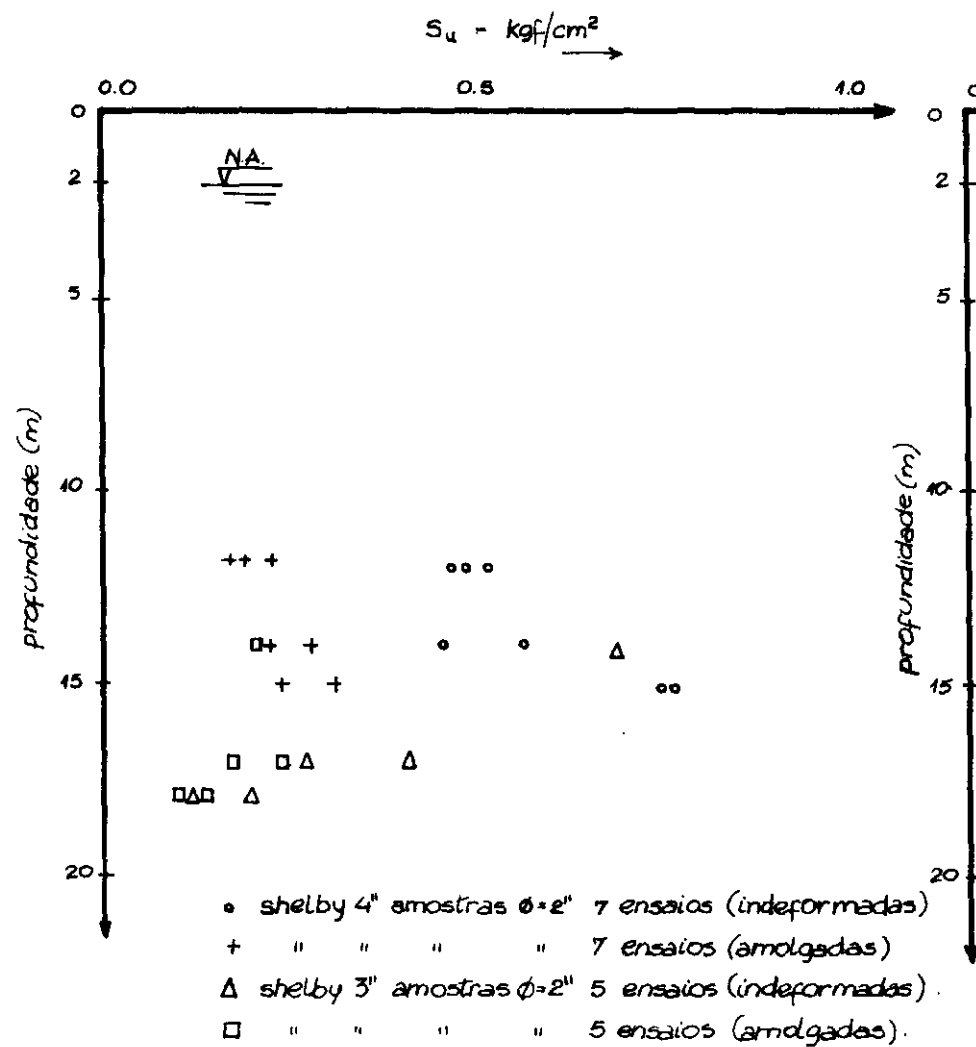


FIG. III-16 ENSAIOS TRIAXIAIS UU  
 RESISTENCIA AO CISALHAMENTO NÃO-DRENADA

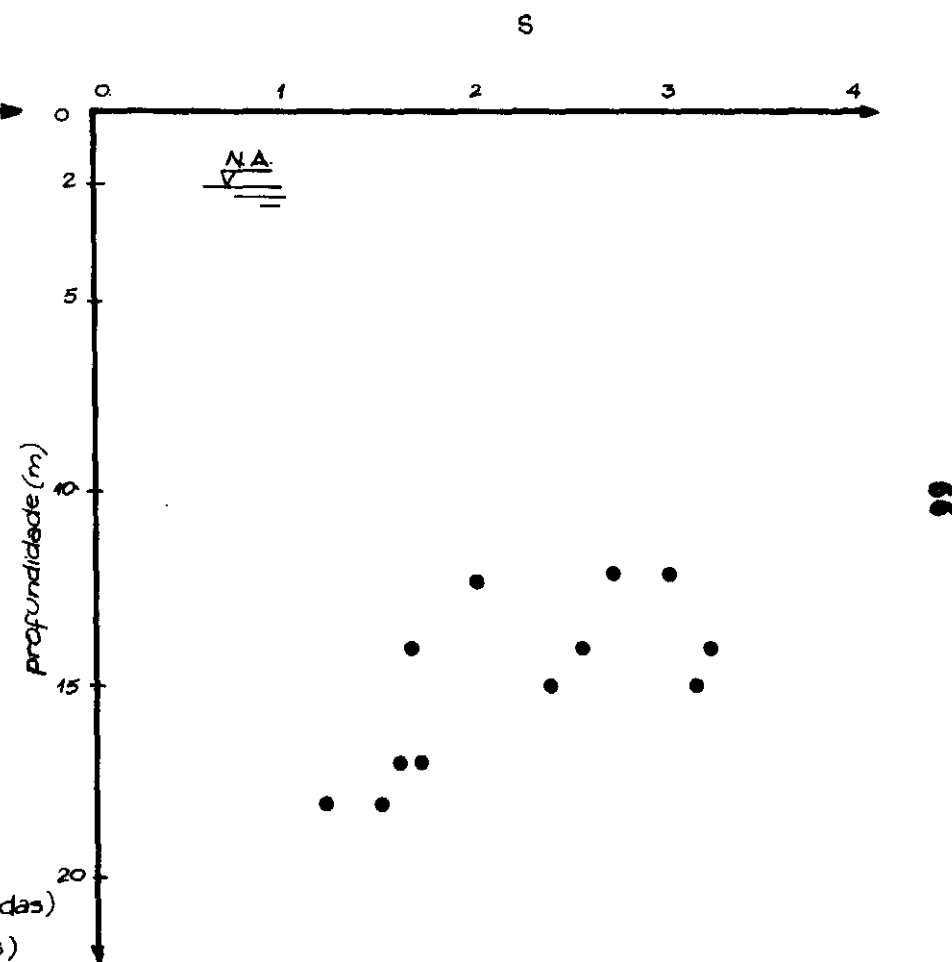


FIG. III-17 SENSIBILIDADE

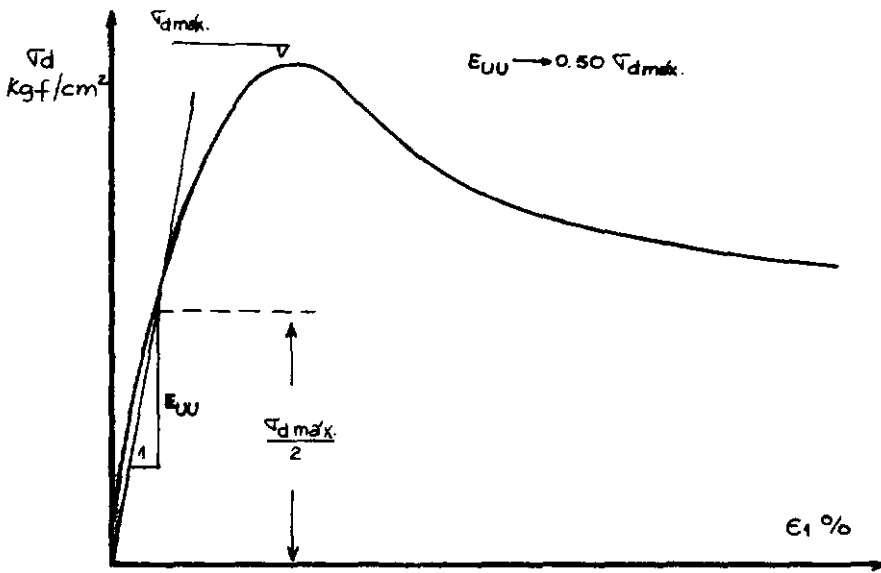


FIG. III - 18 MÓDULO TENSÃO - DEFORMAÇÃO NÃO-DRENADO

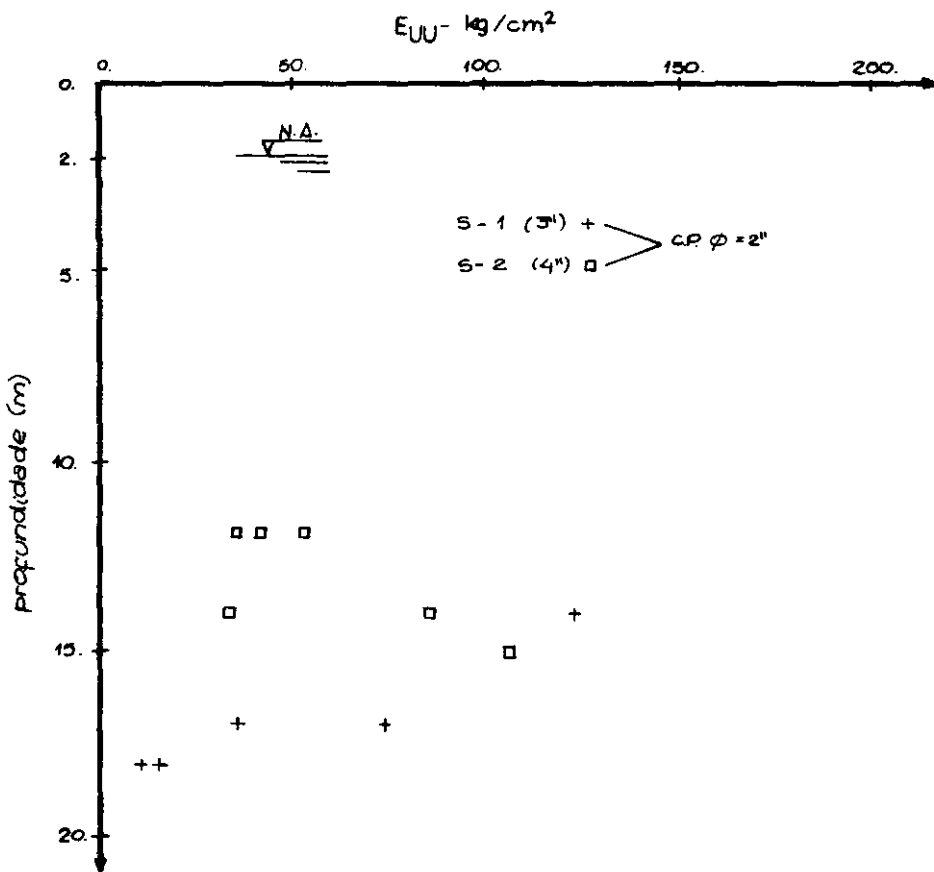


FIG. III - 19 - MÓDULO TENSÃO - DEFORMAÇÃO NÃO-DRENADO

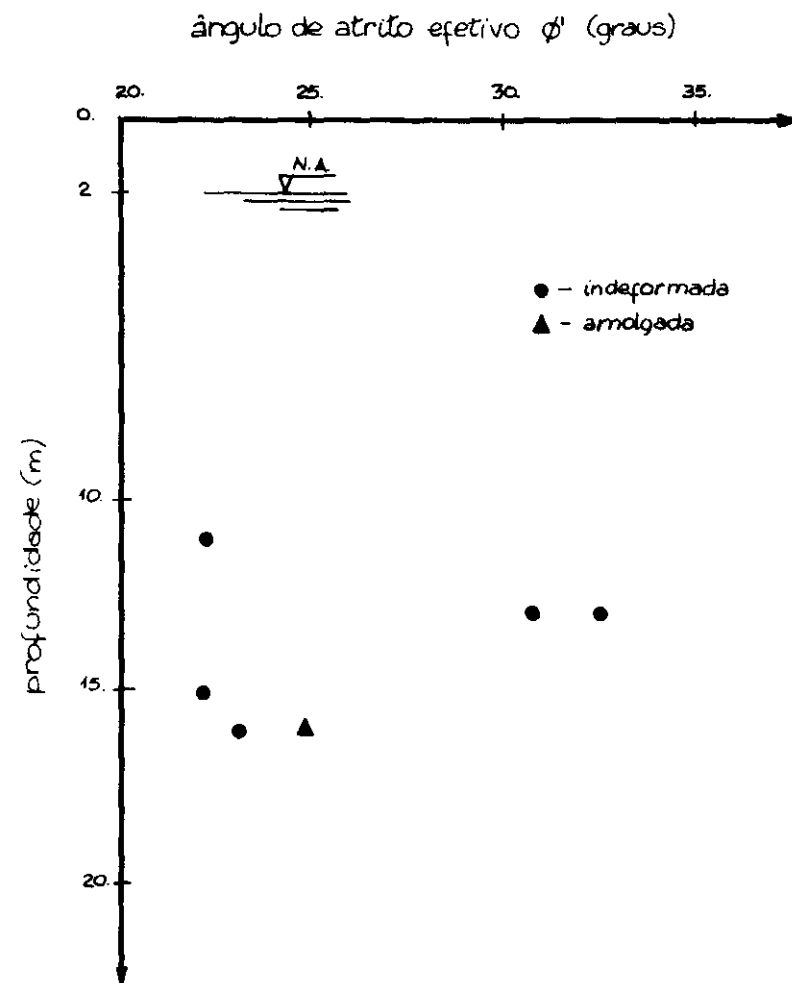
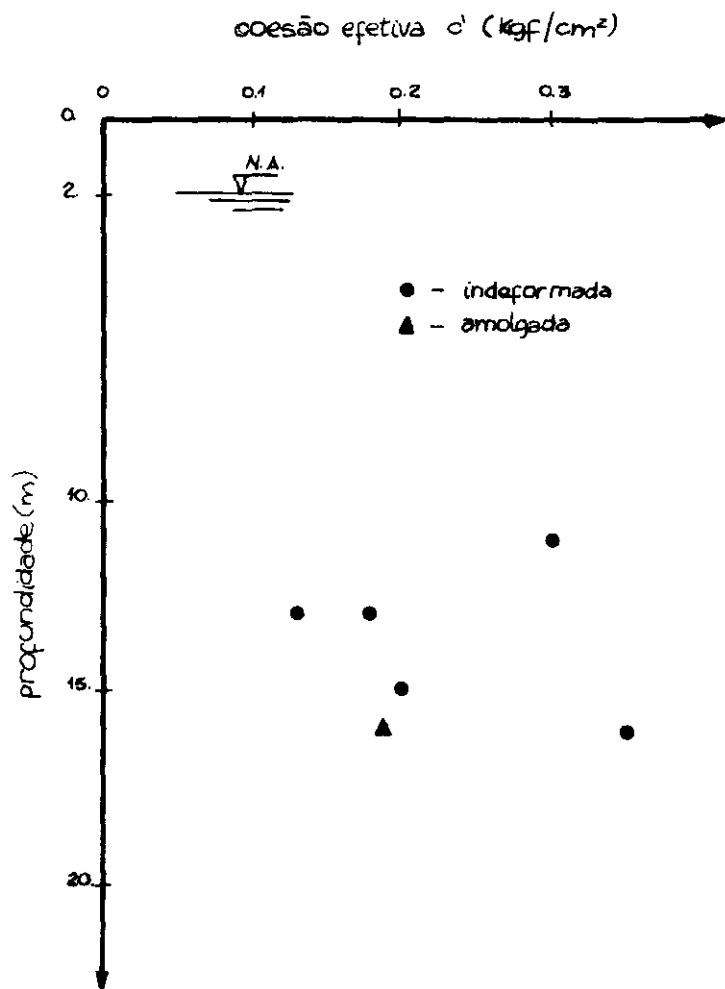


FIG. III.20

|               |         |      |   |                      |                                                      |
|---------------|---------|------|---|----------------------|------------------------------------------------------|
| S-2<br>15.00m | AM Nº 5 | CP-1 | ① | 0.33 $\sigma_d$ máx. | -estágios de creep. $\sigma_3 = 10 \text{ kgf/cm}^2$ |
|               |         |      | ② | 0.66 $\sigma_d$ máx. |                                                      |
|               |         |      | ③ | 1.00 $\sigma_d$ máx. |                                                      |
|               |         | CP-3 | ④ | 0.51 $\sigma_d$ máx. | -deformação controlada                               |
|               |         |      | ⑤ | 0.82 $\sigma_d$ máx. |                                                      |

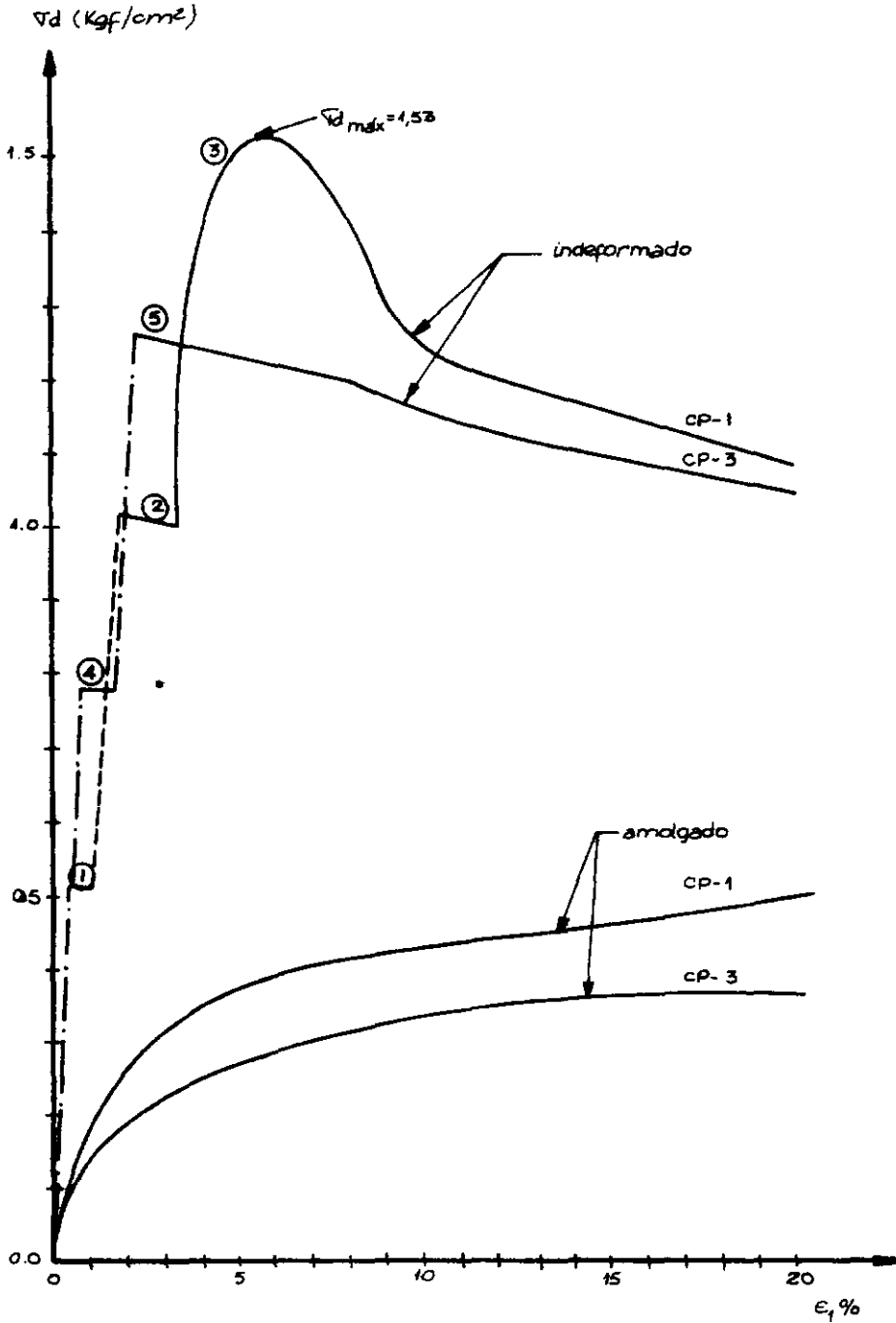


FIG. III-21

TENSÃO - DEFORMAÇÃO  
 ENSAIOS DE CREEP  
 NÃO-ADENSADOS NÃO-DRENADOS

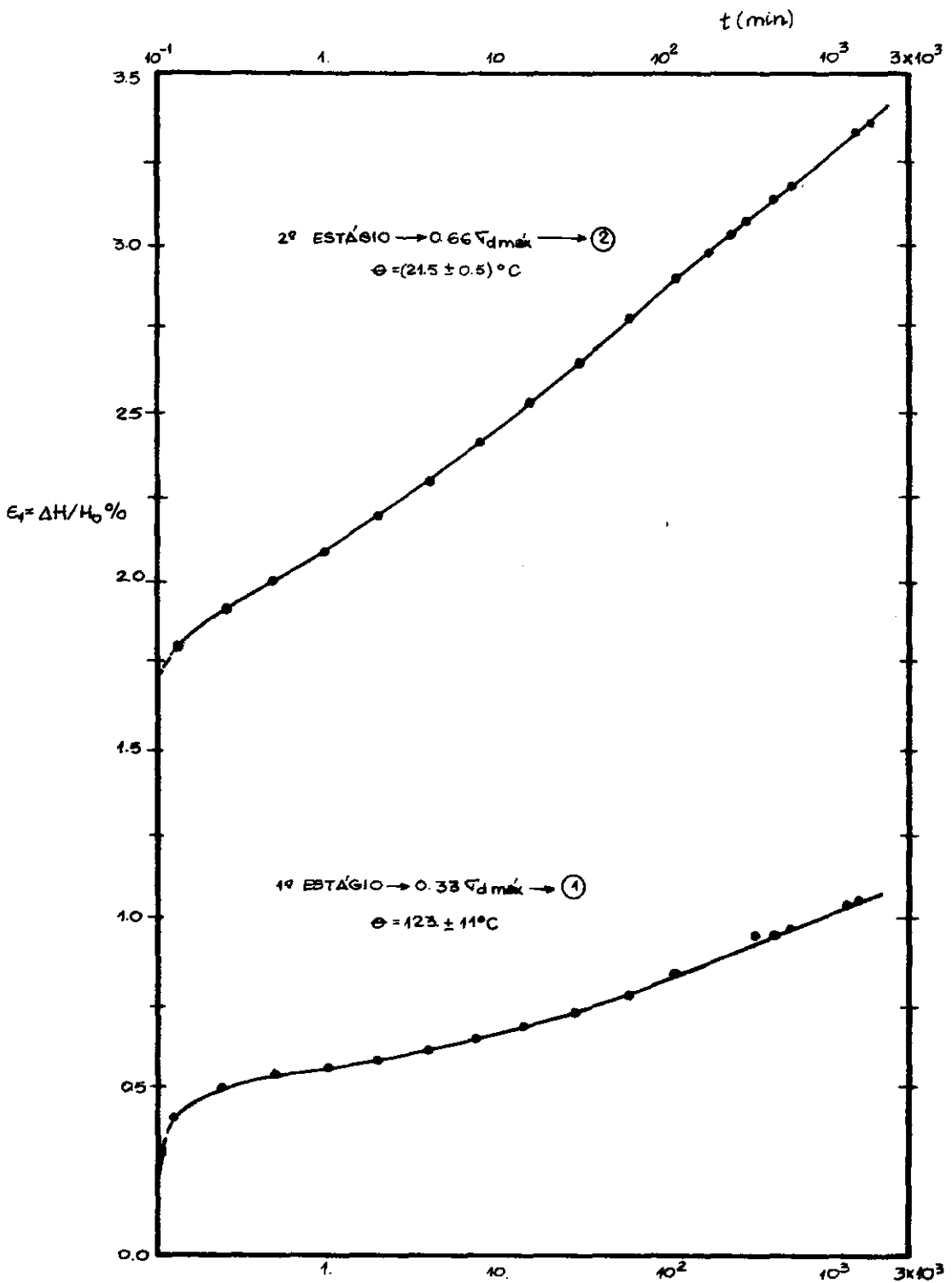


FIG. III - 22 DEFORMAÇÃO - TEMPO  
ENSAIOS DE CREEP NÃO-ADENSADOS  
NÃO - DRENADOS.  
S-2 AM Nº 5 CP-1  
15.00m

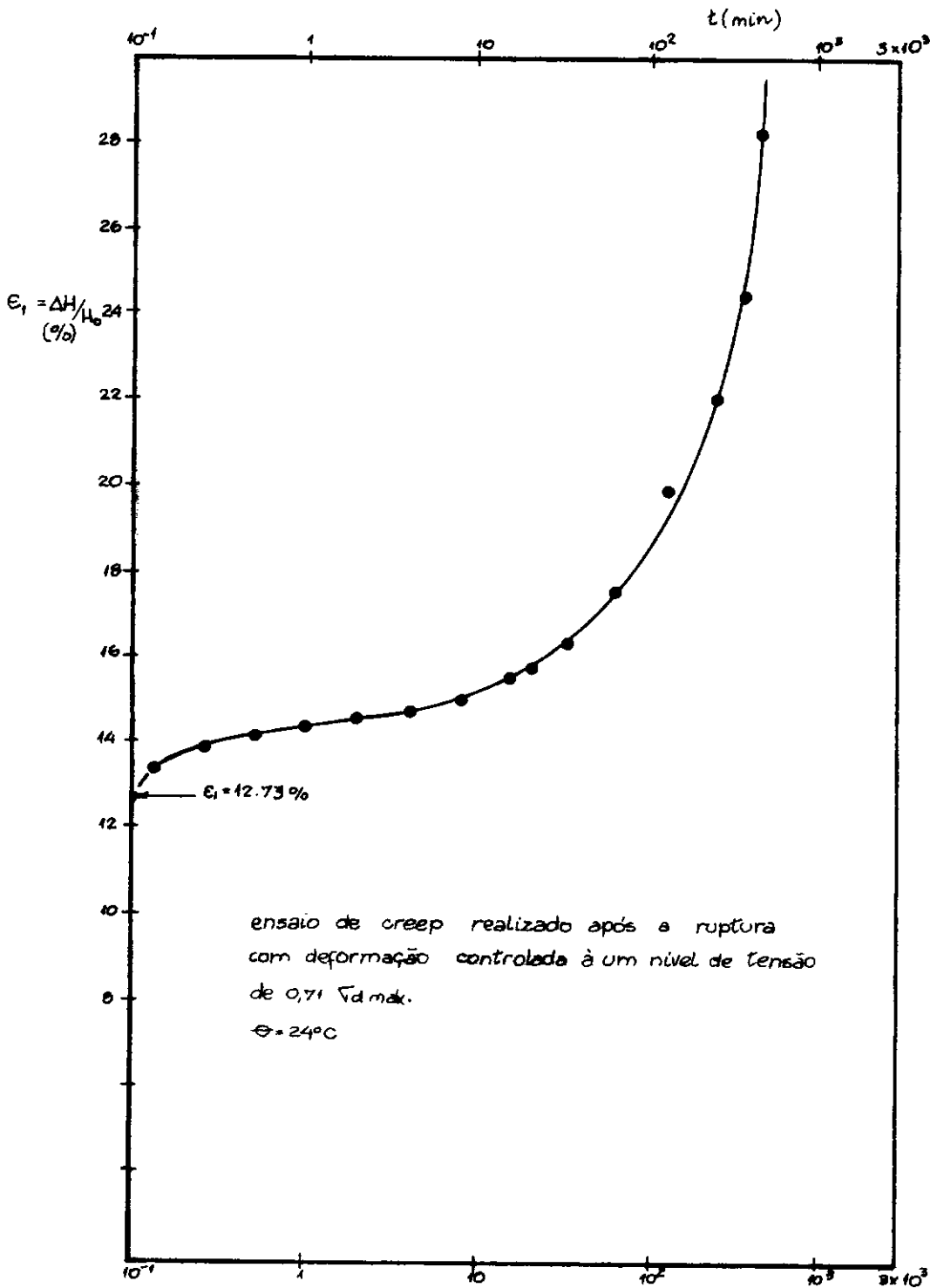


FIG. III. 23 - DEFORMAÇÃO - TEMPO  
 ENSAIO DE CREEP NÃO-ADENSADO NÃO-DRENADO  
 S-2 AM Nº5 CP-2  
 15.00 m

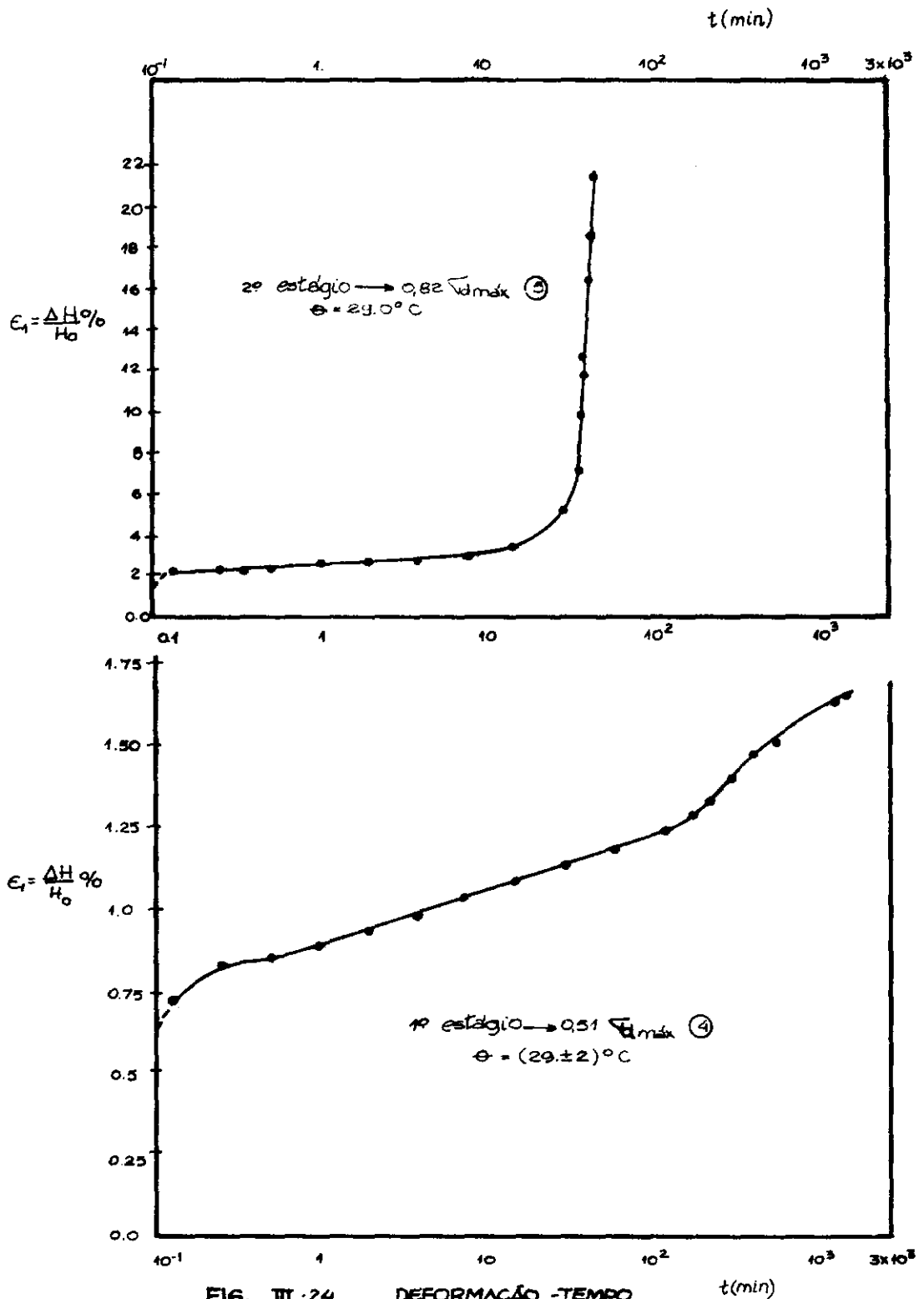


FIG. III-24

DEFORMAÇÃO - TEMPO  
 ENSAIOS DE CREEP NÃO-ADENSADOS  
 NÃO-DRENADOS.

S-2 AM Nº5 CP-3

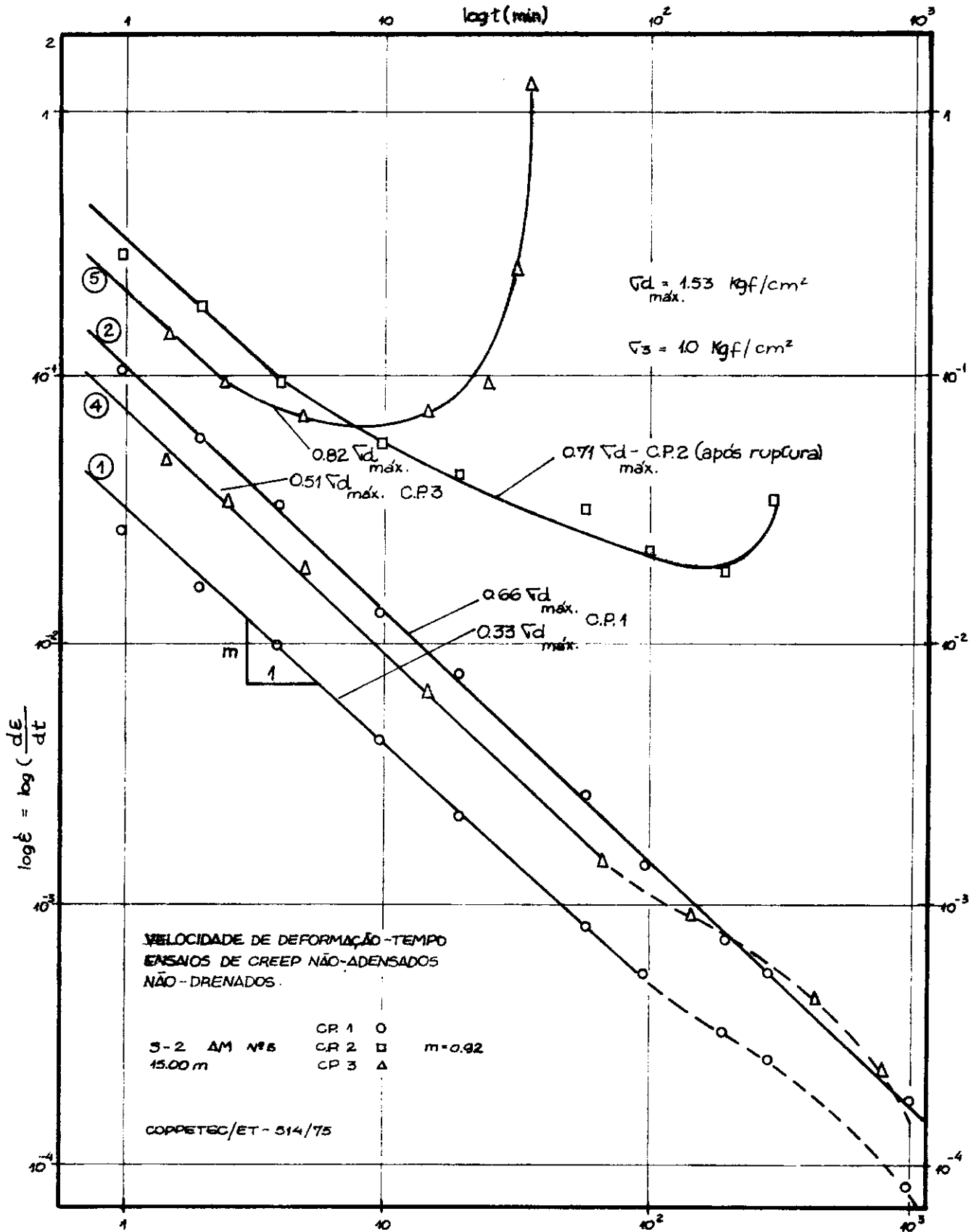


FIG. III - 25



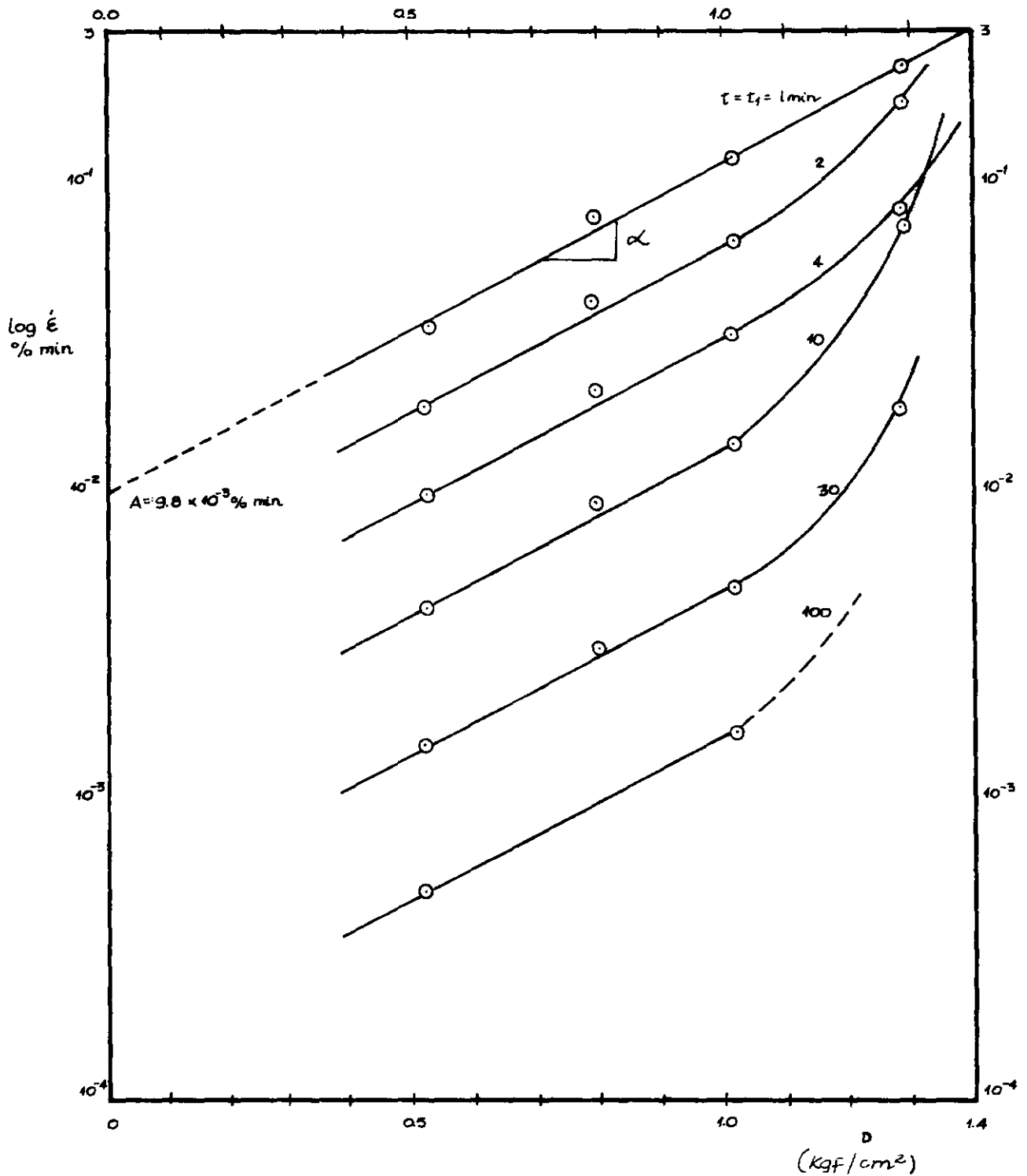


FIG. III - 26 - VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO x TENSÃO DESVIATÓRIA.

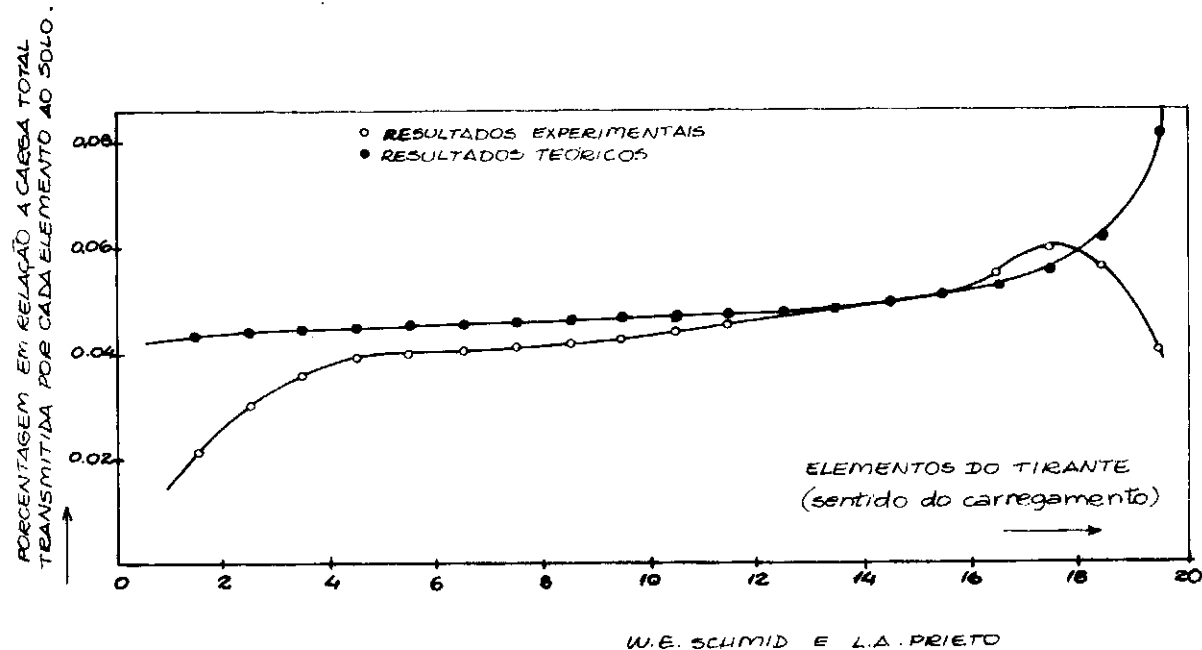


FIG. III.27 DISTRIBUIÇÃO DE CARREGAMENTO  
AO LONGO DO FUSTE DE TIRANTES.

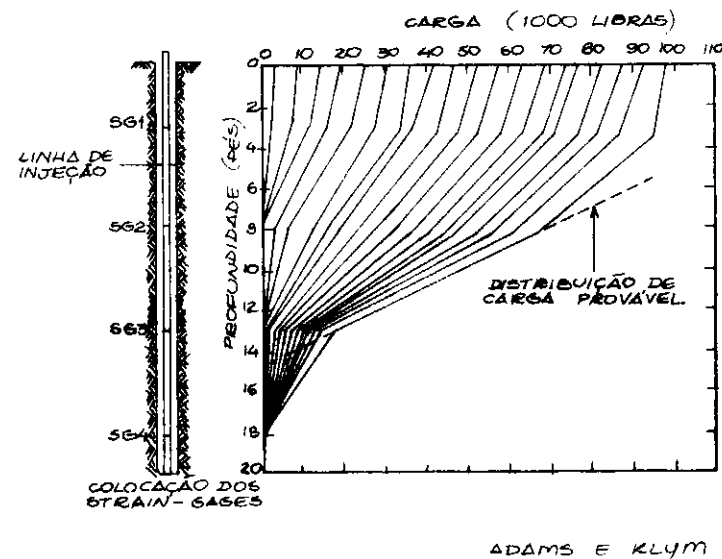


FIG. III.28 DISTRIBUIÇÃO DE CARREGAMENTO  
(ACUMULADO) AO LONGO DO FUSTE DE TIRANTES.

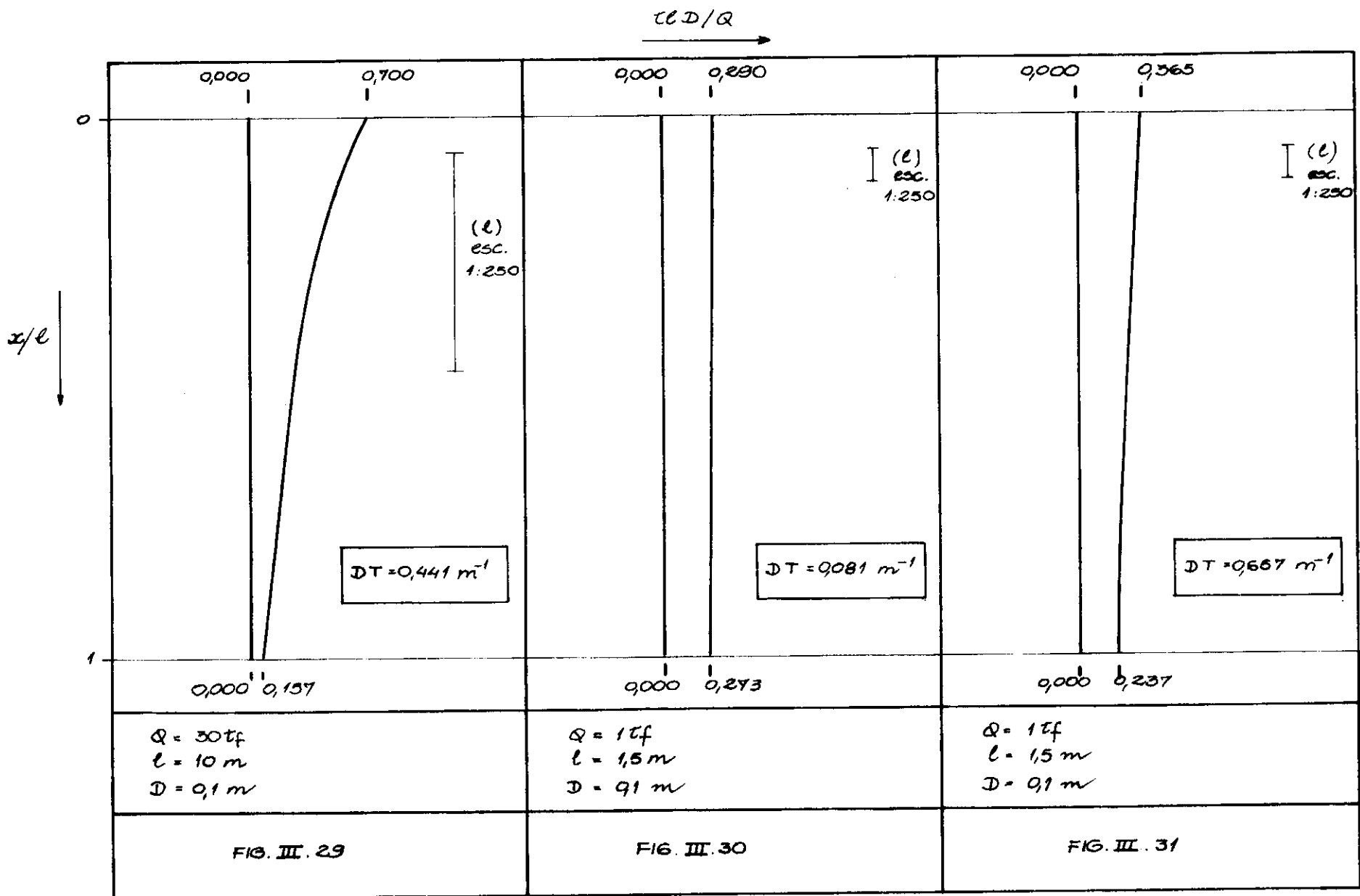


FIG. III. 29 , III. 30 , III. 31. - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES CISALHANTES NOS TIRANTES HIPOTÉTICO, TIPO I E TIPO II , RESPECTIVAMENTE.

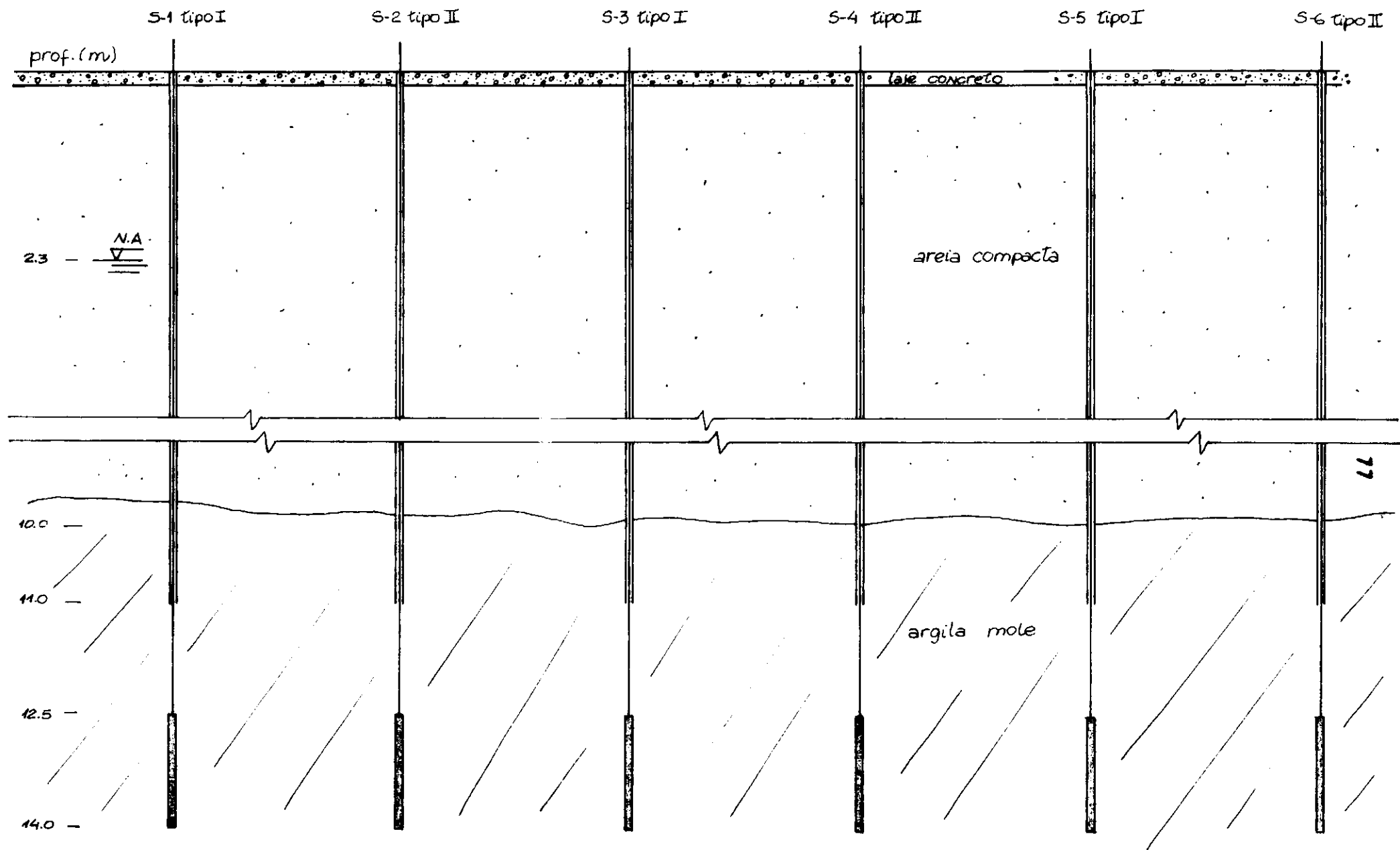


FIG. III. 32 PERFIL LONGITUDINAL

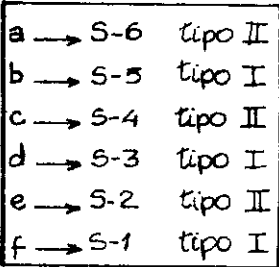


FIG. III.33 PLANTA DE SITUAÇÃO  
ESC. 1:500

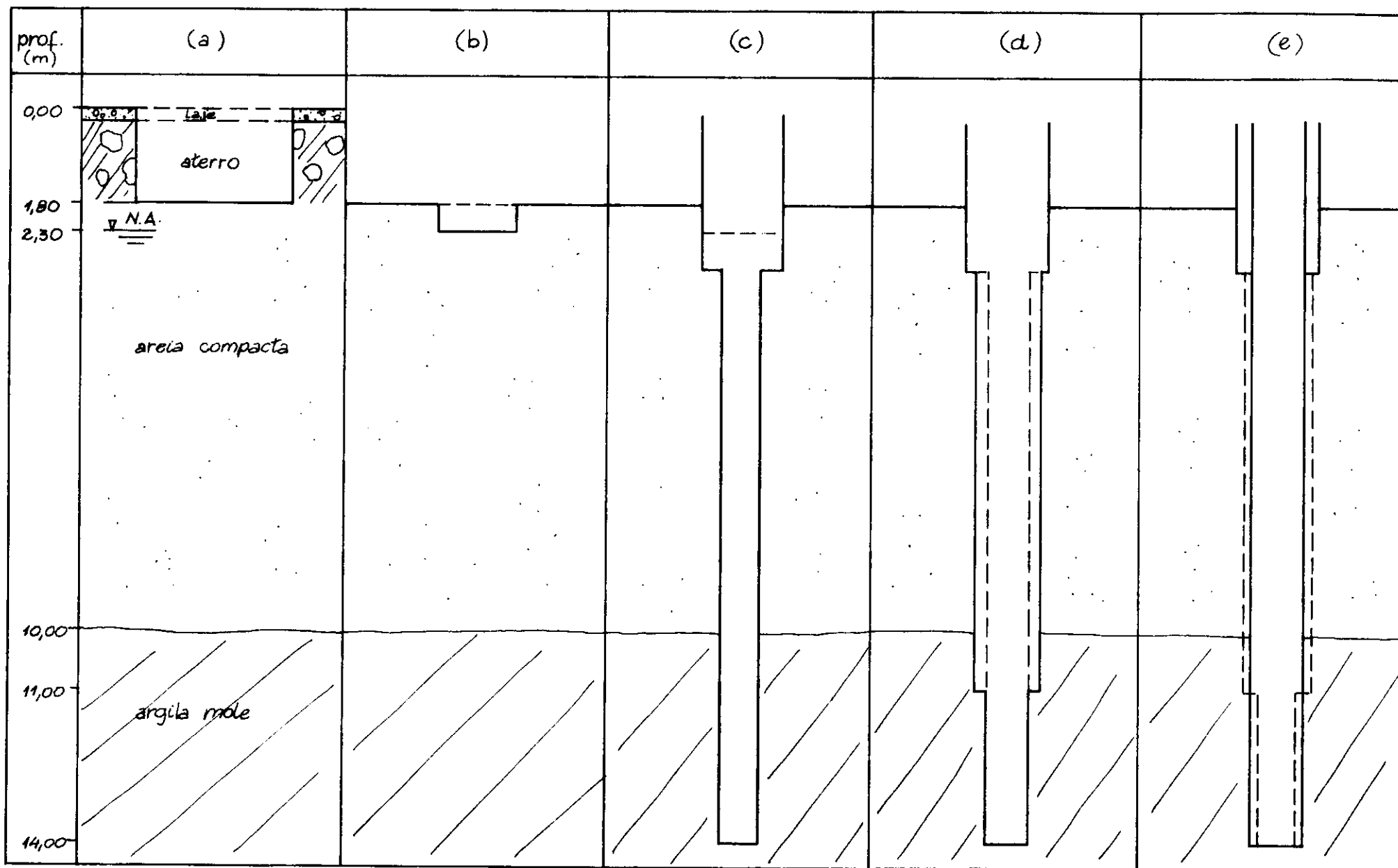


FIG. III.34.a. EXECUÇÃO

escala horizontal — { 1:50 (a)  
1:10 (b,c,d,e,f)  
vertical — 1:100

(a),(b),(c),(d) e (e) ver texto

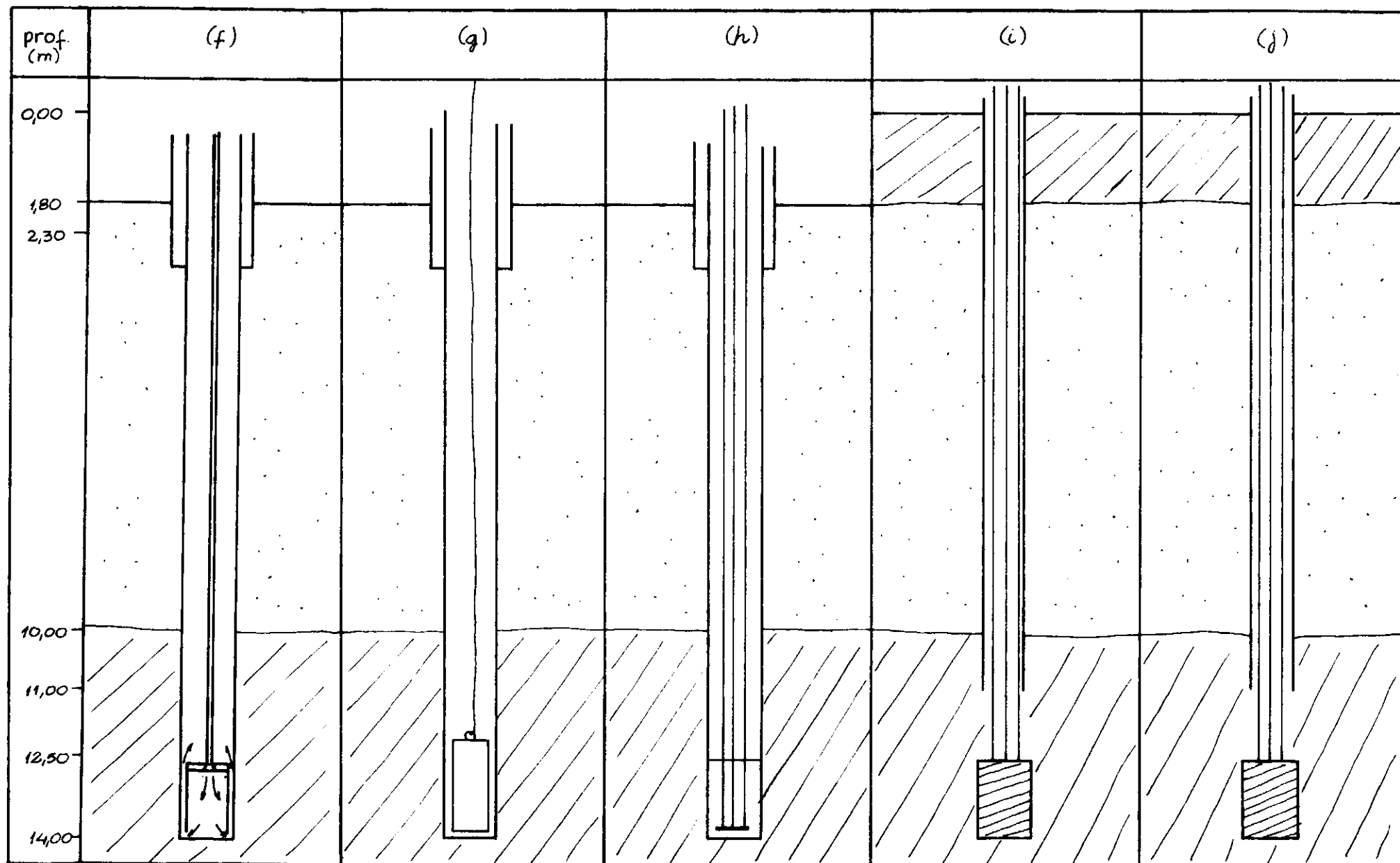


FIG. III. 34 b. EXECUÇÃO

escala horizontal \_\_\_\_ 1:10 (f, g, h, i, j) (f), (g), (h), (i) e (j) ver texto  
 " vertical \_\_\_\_ 1:100

## CAPÍTULO IV

### EQUIPAMENTOS

#### IV.1 ESQUEMA DE ENSAIO

Projetou-se um sistema de tensão controlada, necessário aos ensaios de fluência, assim como um dispositivo para a medição dos deslocamentos, Figuras IV.1 e IV.2.

O sistema de tensão controlada constava dos seguintes equipamentos:

- macaco hidráulico;
- gerador de pressão constante;
- 3 "load-cells", de capacidade de 1 tf e leitora;
- um manômetro; e
- cunhas Freyssinet.

O sistema de medidas de deslocamento era formado pelos seguintes equipamentos:



- um tassômetro;
- uma placa de referência de superfície;
- um equipamento de medida de deslocamentos verticais; e
- um extensômetro.

Mantida constante a pressão no óleo fornecida pelo gerador de pressão, constante seria o carregamento promovido pelo macaco hidráulico nos tirantes. Devido à característica do gerador de pressão, o sistema se auto-mantinha, não sendo necessários ajustes sistemáticos.

O conjunto de "load-cells" funcionava como controle da magnitude e constância do carregamento.

Um extensômetro solidário ao corpo do macaco hidráulico registrava o deslocamento dos cabos de ancoragem em relação a esta referência. Um equipamento especial de medida de deslocamentos verticais determinava os possíveis recalques da base do macaco com relação a uma placa de referência superficial distante do local de ensaio, sendo a indeslocabilidade desta placa verificada através de um tirante descarregado utilizado como um tassômetro.

Os fios por terem um comportamento tensão-deformação, no nível de tensão utilizado, elástico e instantâneo, permitiriam que se obtivesse um relacionamento correto entre o deslocamento da extremidade superior dos mesmos, na qual

se efetuaram as leituras, e os movimentos do bulbo. Isto e ra o que se esperava ã época do planejamento dos ensaios. Depois, durante a execução dos mesmos, verificou-se que nos tirantes tipo II, a maior deformabilidade dos cabos, devida ã menor secção de aço, interagindo com o macaco, não permitia que o carregamento desejado fosse integralmente aplicado de forma praticamente instantânea conforme se previra. Consequentemente, também não foram instantâneas as deformações correspondentes aos cabos.

## IV.2 EQUIPAMENTOS DE CARGA CONSTANTE

### IV.2.1 MACACO HIDRÁULICO, FIGURA IV.3

- fabricante: PONTEMAC
- capacidade de carga: 50 tf
- percurso máximo: 16 cm

### IV.2.2 LOAD-CELLS, FIGURA IV.3, E LEITORA

#### Load-Cells:

- fabricante: KYOWA
- Capacidade de carga: 1 tf

#### Leitora:

- fabricante: KYOWA

IV.2.3 MANÔMETRO, FIGURA IV.4

- fabricante: BUDENBERG GAUGE
- pressão máxima: 150 Kgf/cm<sup>2</sup>
- acurácia: 1Kgf/cm<sup>2</sup>

IV.2.4 CUNHAS FREYSSINET, FIGURA IV.3

- monofio
- doze fios

IV.2.5 GERADOR DE PRESSÃO CONSTANTE, FIGURA IV.4

- fabricado segundo projeto do Autor nas oficinas da COPPE/UFRJ;
- pressão máxima: 75 Kgf/cm<sup>2</sup>

IV.3 EQUIPAMENTOS DE MEDIDA DE DESLOCAMENTOIV.3.1 TASSÔMETRO

A área próxima à cava do metrô está sujeita a recalques devido ao sistema de rebaixamento do lençol d'água em operação no local. Apesar de se ter verificado posteriormente ser a velocidade de recalque muito reduzida ao nível

do bulbo do tirante (da ordem de 0,2 mm/mês para a média do período total de medições realizada entre os dias 2/2/77 e 17/6/77 e 0,05 mm/dia para a média máxima ocorrida entre os dias 16 e 18 de março), acreditava-se a princípio que tal fator seria de grande importância no caso de ensaios de longa duração. Por este motivo, adotou-se como sistema de referência o bulbo de um tirante descarregado, conforme esquema (Figura IV.5).

Pelas medições efetuadas, verificou-se posteriormente que realmente estes deslocamentos somente apresentavam-se significativos para os ensaios de longa duração (Figura IV.6).

#### IV.3.2 PLACA DE REFERÊNCIA DE SUPERFÍCIE

Foi situada próxima ao tassômetro, que lhe verificava os possíveis deslocamentos verticais gerados pelo rebaixamento, e distante da área de influência dos possíveis recalques localizados oriundos da prova de carga (Figura IV.5).

#### IV.3.3 EQUIPAMENTO DE MEDIDA DE DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Visando-se à medição de possíveis recalques localizados entre a base do macaco utilizado para o carregamento

e a placa de referência de superfície, foi desenvolvido um equipamento baseado no princípio dos vasos comunicantes. É constituído de mercúrio, querosene e água dispostos de maneira a propiciar uma ampliação dos movimentos verticais e, conseqüentemente, permitir uma melhor acurácia na medição destes deslocamentos, Figura IV.7, (Ehrlich <sup>12</sup>).

A acurácia do equipamento permite leituras com um erro de mais ou menos 4 centésimos de milímetro. Durante os ensaios não foram constatados deslocamentos oriundos deste recalque que excedessem este valor.

#### IV.3.4 EXTENSÔMETRO

Utilizou-se um extensômetro de fio, conforme Figuras IV.8 e IV.9 para, respectivamente, os tirantes tipo I de 8 fios e tipo II, monofio.

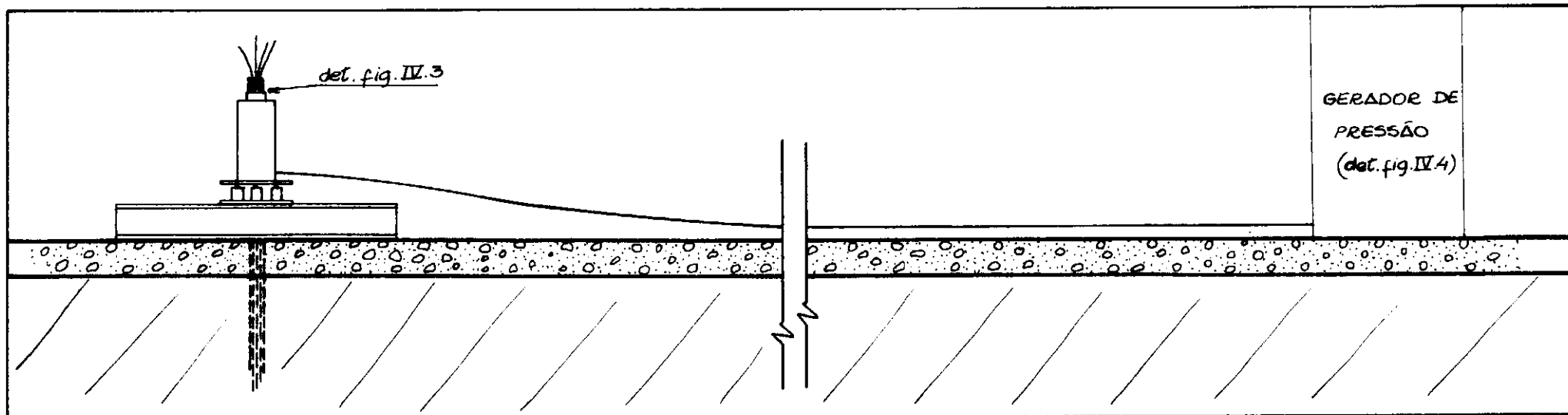
A acurácia do aparelho permite leituras de décimo de milímetro; as medições efetuadas foram realizadas por interpolação visual até centésimo de milímetro.

Com exceção dos ensaios de longa duração, os deslocamentos medidos por este aparelho representaram o movimento dos tirantes sob carregamento.



GERADOR DE  
PRESSÃO

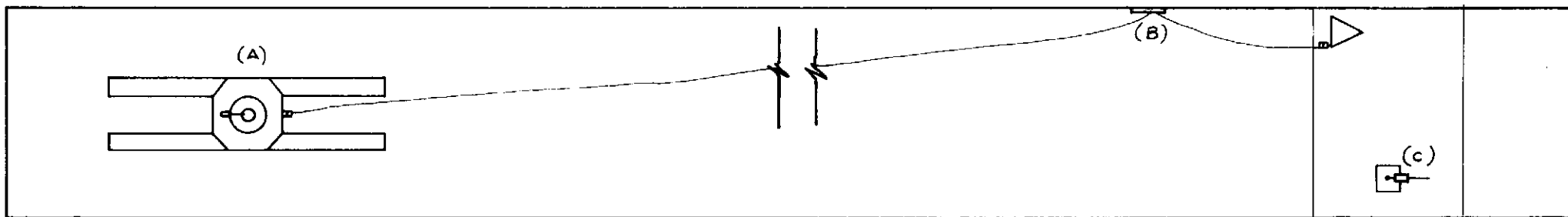
(PLANTA)



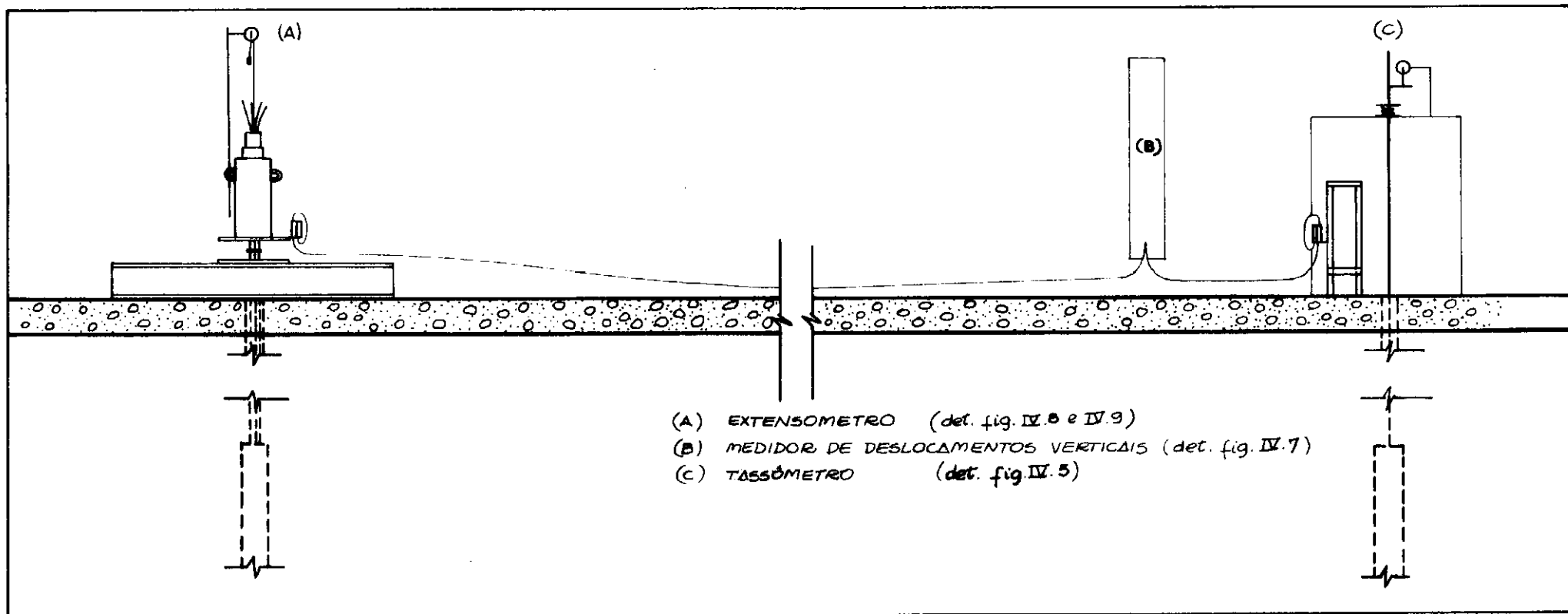
GERADOR DE  
PRESSÃO  
(det. fig. IV.4)

(PERFIL)

FIG. IV.1 ESQUEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA



( PLANTA )



- (A) EXTENSOMETRO (det. fig. IV.8 e IV.9)
- (B) MEDIDOR DE DESLOCAMENTOS VERTICAIS (det. fig. IV.7)
- (C) TASSÔMETRO (det. fig. IV.5)

( PERFIL )

FIG. IV.2. ESQUEMA DE MEDIDA DE DESLOCAMENTO

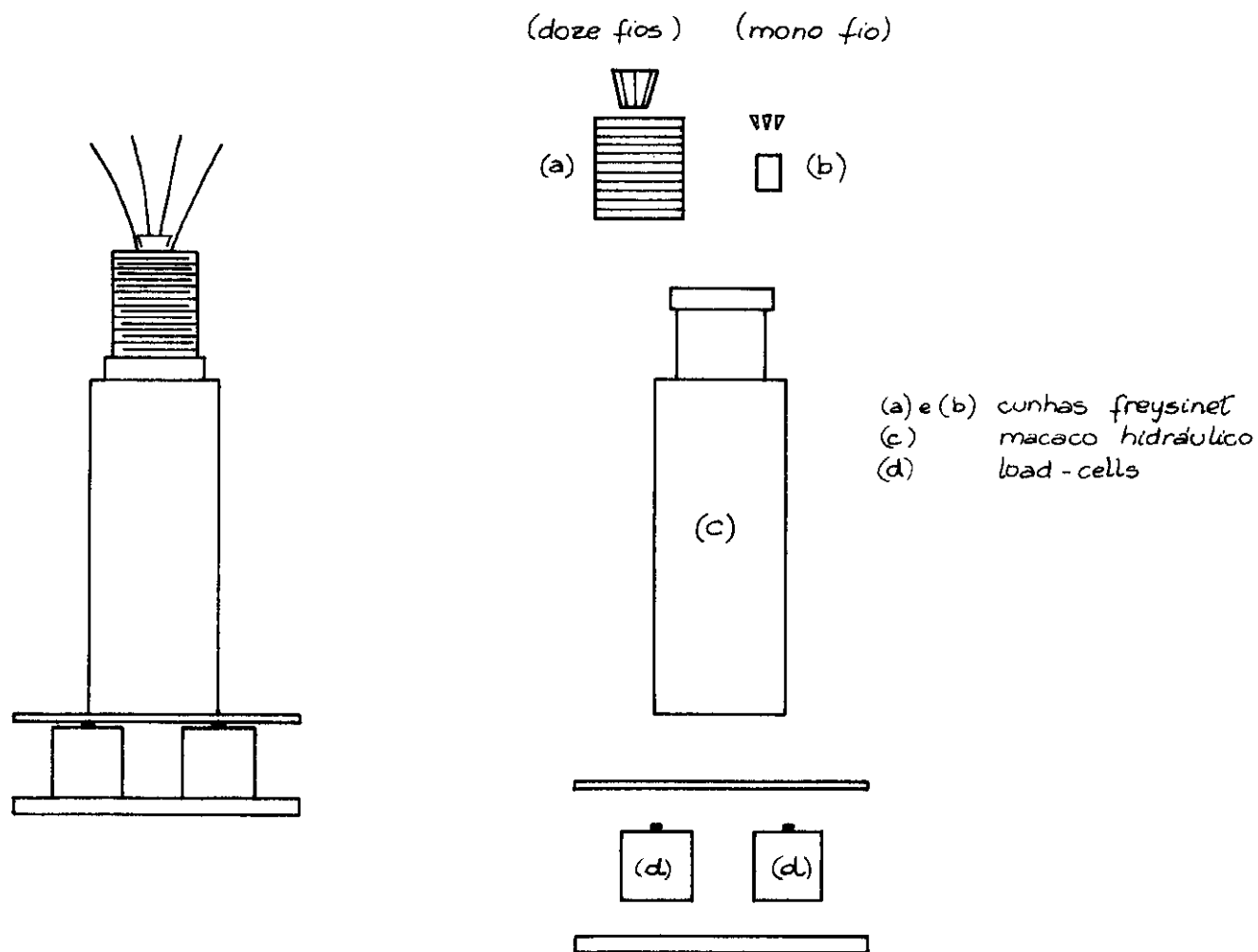


FIG. IV 3 DETALHE      esc. 1:10



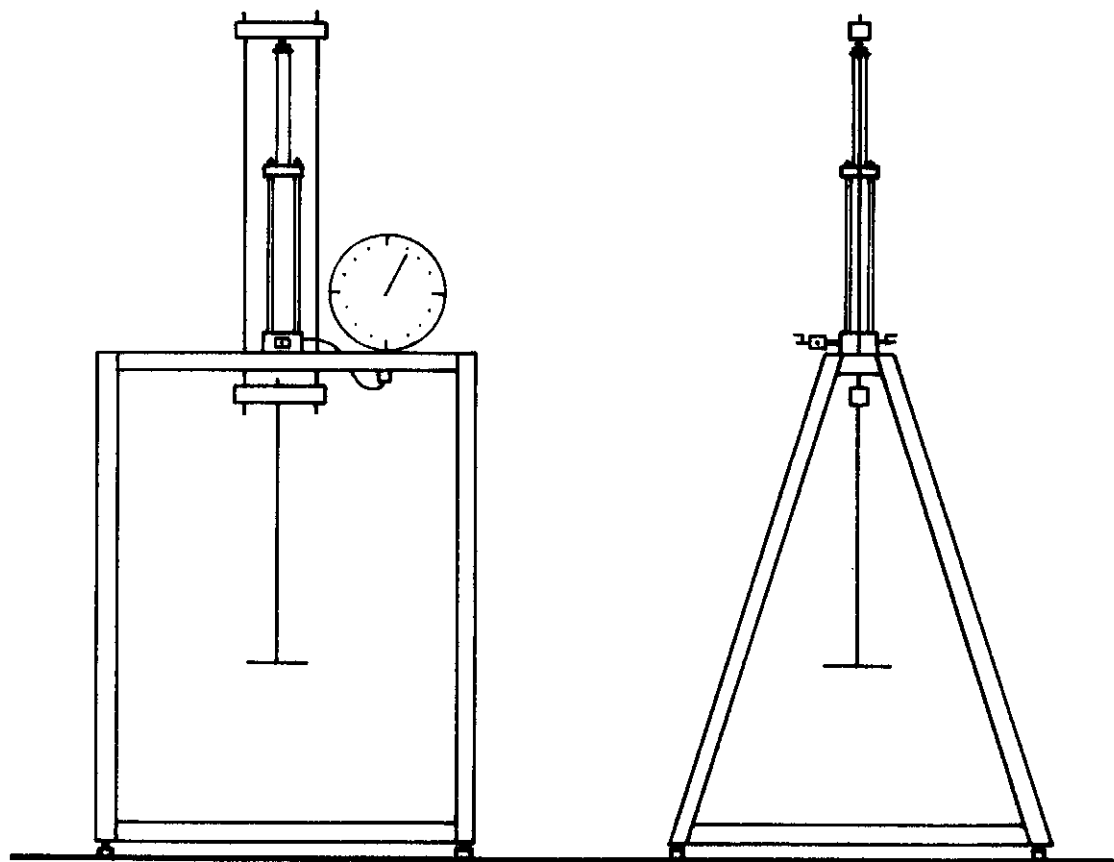


FIG. IV.4 GERADOR DE PRESSÃO escala 1:20

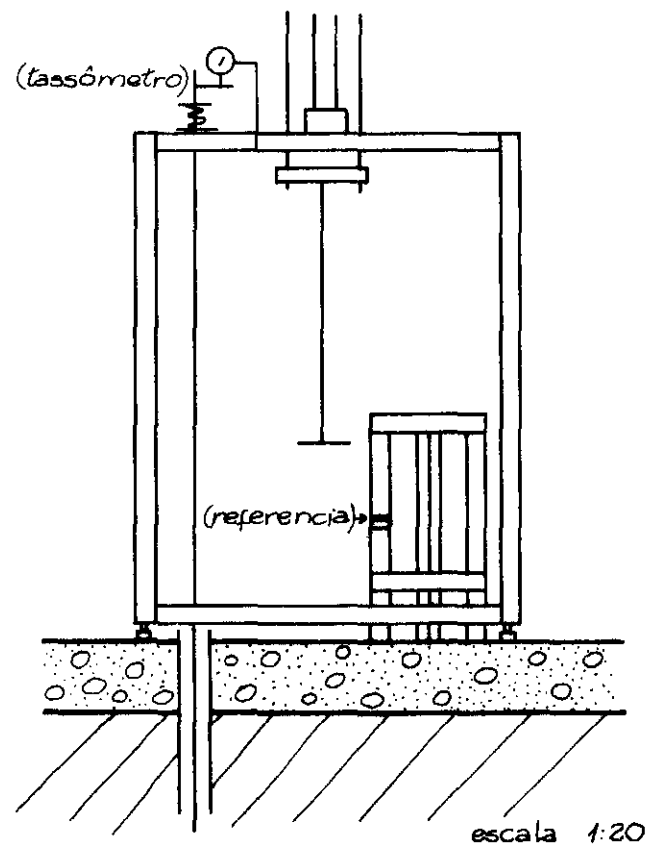


FIG. IV.5. TASSÔMETRO E PLACA DE REFERENCIA

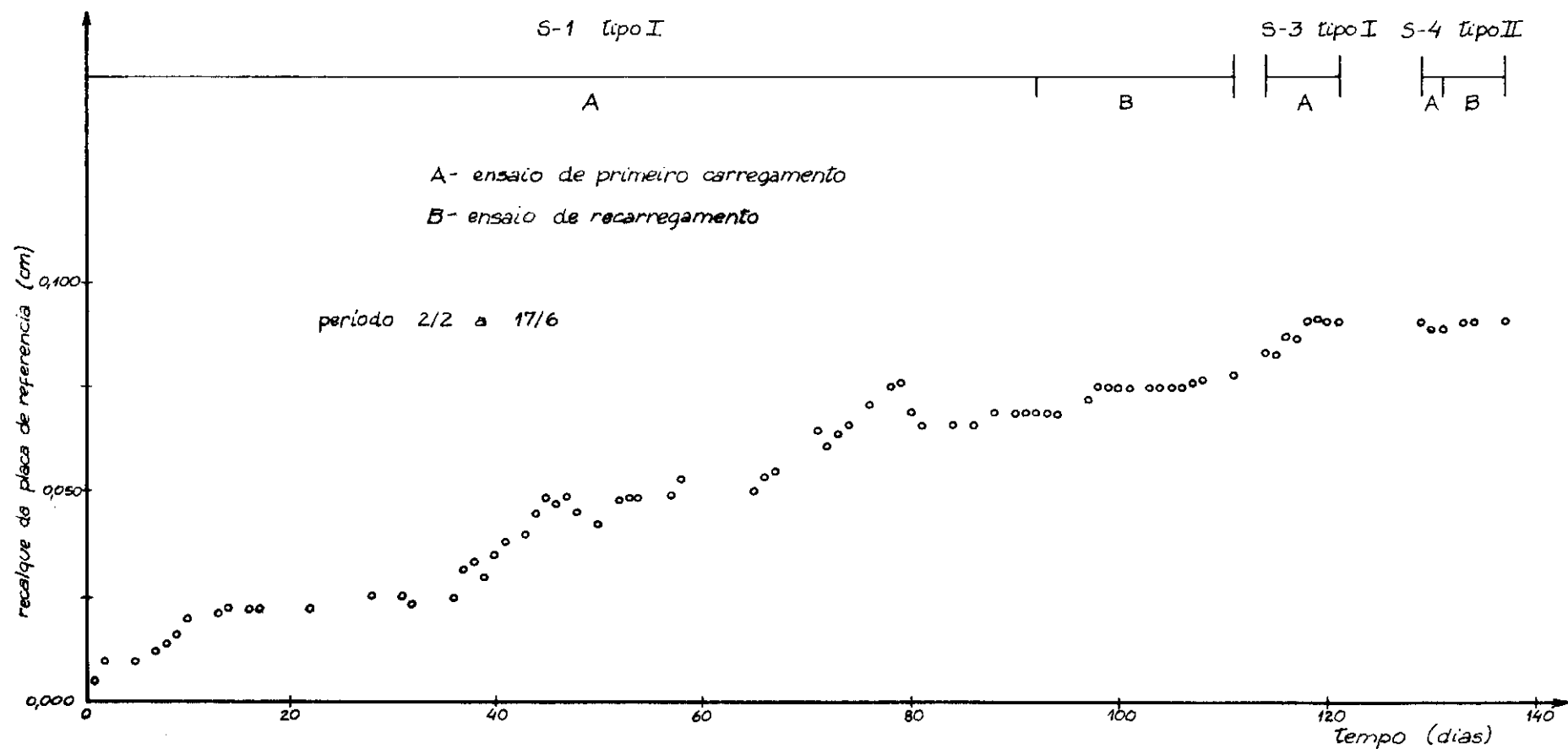


FIG. IV.6

GRÁFICO TEMPO-RECALQUE

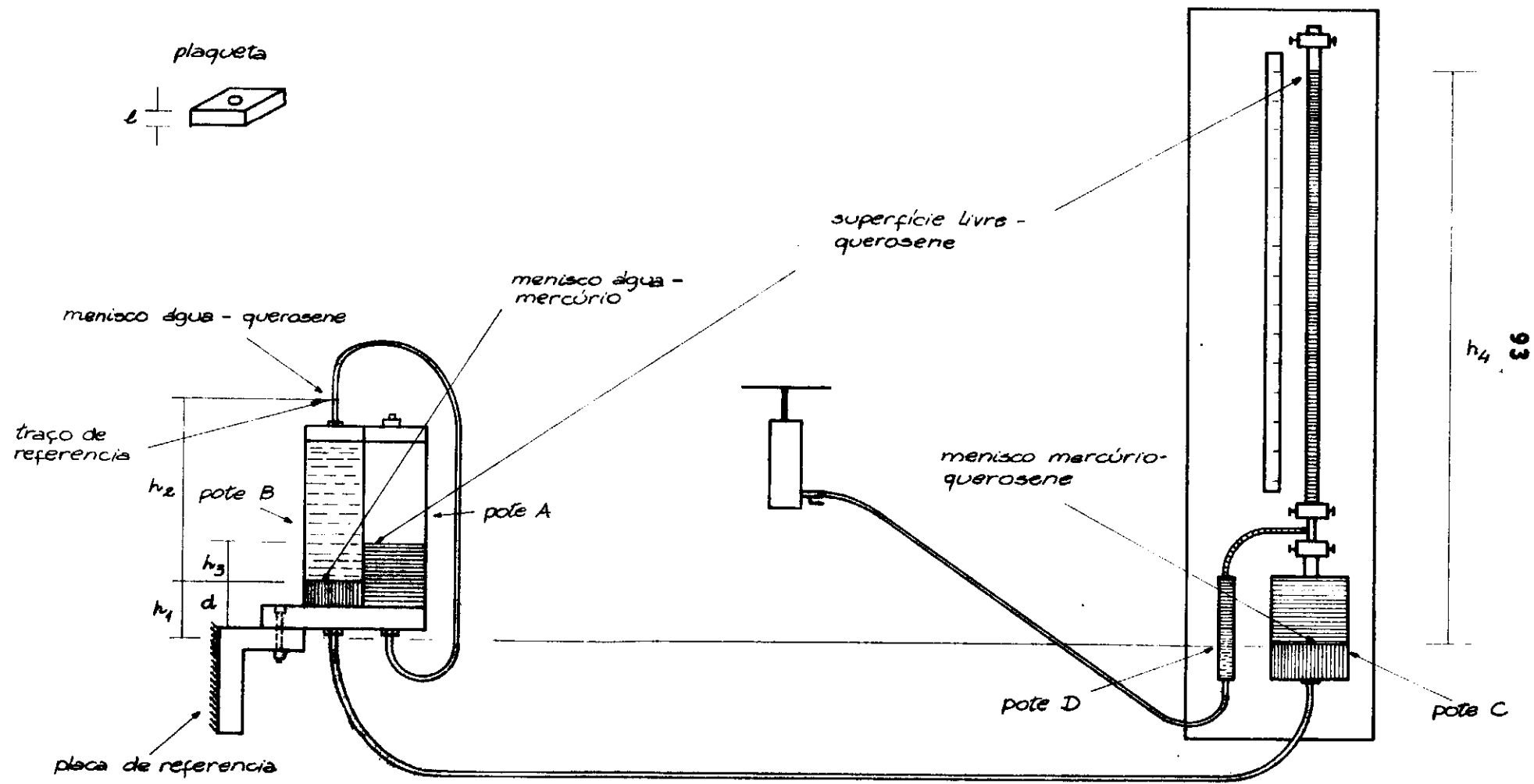


FIG. IV. 7 EQUIPAMENTO DE MEDIDA DE DESLOCAMENTOS VERTICAIS.

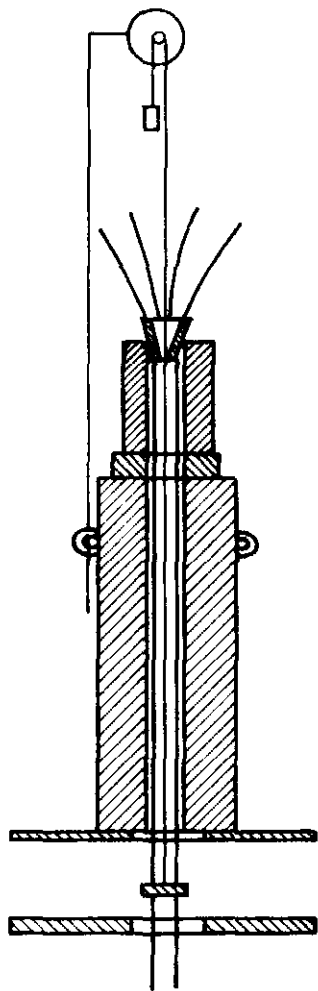


FIG. IV 8. EXTENSOMETRO  
(tirante tipo I)

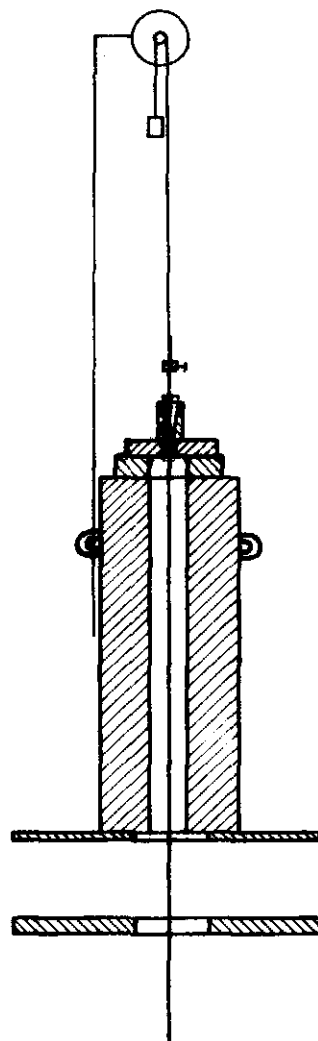


FIG. IV 9. EXTENSOMETRO  
(tirante tipo I)

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS

#### V.1 INTRODUÇÃO

Ensaio de primeiro carregamento e de recarregamento (após primeira ruptura) foram efetuados sob estágios de carga constante.

Baseando-se num primeiro ensaio no qual o carregamento até a ruptura foi realizado em estágios de carga constante de pequeno período de duração (tirante S-5 tipo I), planejou-se os demais com maior tempo de manutenção de cada carregamento. Frações da carga de ruptura deste primeiro ensaio, foram aplicadas em etapas nos demais tirantes.

O segundo tirante a ser ensaiado (tirante S-1 tipo I) foi submetido a estágios de carga constante de longa duração, atingindo a ruptura com valores superiores ao do primeiro ensaio, realizado rapidamente. Este acréscimo de re

sistência pode ter sido causado por dissipação da pressão neu  
tra, durante o ensaio mais longo.

O terceiro ensaio (tirante S-3 tipo I), foi de menor tempo de duração relativamente ao segundo, com vista a minimizar-se a possibilidade de dissipação de pressão inters  
ticial.

O quarto ensaio (tirante S-4 tipo II), idêntico ao terceiro, por se tratar de um tirante do segundo tipo per  
mitiu uma análise comparativa da diversidade de comportamen  
to de elementos com bulbos ancorados rígidos e flexíveis.

## V.2 ENSAIOS COM O TIRANTE S-5 TIPO I

### V.2.1 INTRODUÇÃO

Por tratar-se de um tirante tipo I, no qual há grande rigidez estrutural do bulbo em relação ao solo circun  
vizinho (ver seção III.3), acredita-se que durante o carrega  
mento as tensões desenvolvidas ao longo do fuste do mesmo, tenham tido uma distribuição razoavelmente uniforme.

Devido à velocidade dos ensaios, relativamente à capacidade de dissipação de poro-pressões do material, uma argila orgânica com coeficiente de adensamento da ordem de  $10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s, acredita-se na validade de considerá-los como

não drenados.

A um primeiro ensaio realizado em estágios de carregamento constante até a ruptura, sucederam-se outros recarregamentos. Procedendo-se ao descarregamento ao final de cada ensaio.

#### V.2.2 CAPACIDADE DE CARGA

Os ensaios neste tirante foram iniciados 106 dias após sua execução.

Num ensaio de primeiro carregamento realizado em oito estágios de acréscimo de carga, mantidos cada um durante igual intervalo de tempo, atingiu-se a ruptura, em 38 minutos.

Durante cada estágio foram realizadas leituras de deformação a intervalos de tempo determinados.

O valor da carga de ruptura, aqui designada de "primeira", foi de 1409 Kgf. Descontado o peso próprio do tirante, 75 Kgf, tem-se que a carga efetivamente aplicada foi de 1334 Kgf (todos os valores de carregamento apresentados a seguir, já representam a carga efetivamente aplicada).

Considerando o bulbo de 160 cm de comprimento e



11,45 cm de diâmetro (5755 cm de área lateral), tem-se que a tensão média de "primeira" ruptura ao longo do fuste de ancoragem foi de 0,23 Kgf/cm<sup>2</sup>.

Na Figura V.1 apresenta-se a curva tensão-deslocamento desse ensaio, denominado de "ensaio A", representando por A-1 a A-8 respectivamente do 1º ao 8º estágio. Todas as leituras de deslocamento apresentadas estão referidas ã extremidade superior do trecho livre, em relação a uma placa de superfície afastada da área de ensaio. Para os ensaios de maior tempo de duração, realizou-se simultaneamente o acompanhamento do recalque regional originário do rebaixamento na área, desta forma se obtendo uma correta definição do nível de referência (ver item IV.3.1).

Nas Figuras V.2a e V.2b encontram-se apresentadas as curvas tempo-deslocamento em escala log-normal de cada estágio de acréscimo de carregamento.

Atingida a ruptura, o tirante foi descarregado e submetido a novo carregamento, 20 minutos após, de 925 Kgf (69% da carga da "primeira" ruptura). A ruptura brusca foi atingida após 2 minutos de ensaio. A tensão média atuante neste novo carregamento ao longo do fuste de ancoragem foi de 0,16 Kgf/cm<sup>2</sup>.

Descarregado novamente o tirante, foi o mesmo submetido a um terceiro carregamento, logo a seguir, de 819 Kgf

(61% da carga da "primeira" ruptura); o tempo de duração do ensaio foi de 14 minutos, não se atingindo a ruptura brusca apesar de se ter grandes deformações.

Nas Figuras V.3 e V.4 encontram-se representadas as curvas tensão-deslocamento destes dois ensaios, denominados, respectivamente, de "ensaio B" e "ensaio C", e nas Figuras V.6 e V.7, em escala log-normal, o comportamento tempo-deslocamento.

Quatro dias após, realizou-se novo ensaio em dois estágios, 868 Kgf (65% da carga de "primeira" ruptura) mantido durante 290 minutos, seguindo-se um acréscimo de 76 Kgf (6% da carga de "primeira" ruptura). Neste segundo estágio a ruptura brusca foi atingida após 2 minutos de ensaio.

Na Figura V.5 se apresenta a curva tensão-deslocamento deste ensaio denominado "ensaio D", representando-se por D-1 e D-2, respectivamente, os 1º e 2º estágios, e nas Figuras V.8a e V.8b, em escala log-normal, o comportamento tempo-deslocamento.

Comparando-se a tensão "primeira" de ruptura do ensaio,  $0,23 \text{ Kgf/cm}^2$ , com os resultados de ensaios triaxiais tipo UU (isotrópico) para as amostras correspondentes à profundidade de assentamento do tirante (entre 12,5 e 14 m), realizados por Vilela <sup>9</sup>, Figura III.16, vê-se que este valor aproximou-se mais dos resultados dos ensaios com amostras a

molgadas (valores situados entre 0,20 e 0,27 Kgf/cm<sup>2</sup>), do que com amostras indeformadas (0,45 e 0,55 Kgf/cm<sup>2</sup>).

Os ensaios de recarregamento, levados à ruptura, também forneceram valores para tensão média de ruptura (0,16 Kgf/cm<sup>2</sup>) compatíveis com a faixa dos ensaios UU com corpos de prova amolgados.

O valor obtido para a tensão "primeira" de ruptura, que se situou próximo aos resultados dos ensaios amolgados, parece indicar ter a superfície de ruptura se desenvolvido na região amolgada. Possivelmente, esta superfície se formou próxima ao contacto bulbo-solo, pois, para superfícies mais afastadas, tem-se regiões menos afetadas pela execução e menores tensões solicitantes. Entretanto, a hipótese de que a mesma tenha se desenvolvido no contacto, não parece plausível, já que é esperado um aumento de resistência nesta região, em virtude das reações entre o solo e a pasta de cimento durante a pega desta. Segundo a estimativa feita no final do item V.3.4 a espessura (e) do solo envolvido na ruptura, ao redor do tirante submetido a ruptura foi de 3 cm, Figura V.12.

Na execução, embora se tenha procurado minimizar o amolgamento do material esperava-se uma perturbação razoável, pelo menos próximo à superfície de contacto.

Baseado em trabalhos experimentais de laboratório de Ali<sup>13</sup> e Bhatnagar<sup>3</sup>, Vesic<sup>1</sup> assinala a importância

da contribuição de pressões neutras negativas na capacidade de carga de tirantes, oriundas do deslocamento do bulbo de ancoragem em solos saturados de baixa capacidade de dissipação de poro-pressão.

Com o deslocamento, há uma tendência de formação de um vazio abaixo da base do bulbo do tirante, ocasionando sucção da água da região.

É razoável se supor que o valor mínimo desta pressão corresponde a pressão absoluta nula (pressão relativa igual a menos 1 atm). Daí, como a área da seção transversal da base do tirante tem o valor de  $103 \text{ cm}^2$ , conclui-se que a máxima contribuição desta sucção aos valores da capacidade de carga medida, seria de 206 Kgf, cerca de 14,6% da carga "primeira" de ruptura, e 20,6% e 20,2% para, respectivamente, os ensaios de recarregamento levados à ruptura - "ensaio B" e "ensaio D".

As curvas tempo-deslocamento do ensaio de "primeiro carregamento" apresentaram uma rápida redução da velocidade de deformação, tendendo à estabilização. O comportamento do penúltimo estágio não diferiu basicamente dos demais. O último estágio, no qual se atingiu a ruptura, foi a única exceção: a velocidade de deformação teve sempre um valor crescente.

Nos demais ensaios de recarregamento, as curvas

tempo-deslocamento, comportaram-se todas conforme o último estágio dos ensaios de primeiro carregamento, possivelmente devido ao alto nível de tensões adotado, muito próximo ao de ruptura.

### V.2.3 SENSIBILIDADE

Após a ruptura, desde que mantida a umidade inicial, as argilas experimentam uma queda de resistência devido a modificações estruturais. Com o tempo, efeitos tixotrópicos acarretam uma recuperação desta perda, em maior ou menor grau, dependendo da argila.

A sensibilidade da argila natural, segundo ensaios de laboratório realizados por Vilela<sup>9</sup>, com amostra da profundidade de assentamento do tirante, foi de:

$$S = \frac{S_u \text{ indeformado}}{S_u \text{ amolgado}} = 1,7 \text{ a } 3,3$$

onde:

$S_u$  indeformado - resistência não drenada indeformada

$S_u$  amolgado - resistência não drenada amolgada.

Também se pode definir sensibilidade (S) como a relação seguinte, obtida nos ensaios de tirantes:

$$S = R_I / R_{II}$$

sendo:

$R_I$  - resistência à "primeira" ruptura, conforme definido anteriormente no item V.2.1;

$R_{II}$  - resistência ao recarregamento.

A sensibilidade assim definida teve o valor de 1,44.

Acredita-se que o intervalo de 106 dias entre a execução e o ensaio tenha contribuído para o aumento da capacidade de carga do tirante, que possivelmente teria um valor próximo ao verificado para o recarregamento, e, portanto, sensibilidade igual a 1, se este ensaio fosse executado imediatamente sem qualquer intervalo.

De acordo com a hipótese acima, considerando-se a capacidade de carga ao final de construção igual à verificada para o recarregamento, e comparando a sensibilidade do ensaio do tirante, 1,44, com a faixa determinada em laboratório, entre 1,7 e 3,3, tem-se que a porcentagem de recuperação de resistência nestes 106 dias situa-se entre 63 e 19%.

#### V.2.4 COMPORTAMENTO TENSÃO-DESLOCAMENTO-TEMPO

Nos solos, as relações tensão-deformação são em maior ou menor grau, dependentes do tempo.

Para o material em que foi estabelecido o bulbo do tirante, os ensaios realizados por Vilela<sup>9</sup>, salientaram ser a variável tempo de importância no seu comportamento.

Na Figura V.9 são apresentadas as curvas tempo-deslocamento-tensão, traçadas utilizando-se o princípio da superposição de efeitos, reunindo os estágios do "ensaio A" de primeiro carregamento apresentando-se englobadas as deformações do aço. Igualmente, na Figura V.10 são apresentadas as curvas tempo-deslocamento-tensão, reunindo os dois estágios de carregamento do "ensaio D".

Na Figura V.11 são apresentadas as curvas tempo-deslocamento-tensão, reunindo os ensaios de carregamento "B" e "C" após primeira ruptura, englobando as deformações do aço.

Analisando o formato da curva tempo-deslocamento-tensão do "ensaio A" de primeiro carregamento verifica-se um grande deslocamento ao primeiro estágio. Este deslocamento diverge da tendência de comportamento dos demais estágios. Como este estágio correspondeu ao primeiro carregamento desse tirante, que se encontrava anteriormente totalmente descarregado, acredita-se que uma parcela significativa deste

deslocamento se deva a acomodações e ao desentortamento dos cabos. Por este motivo, prolongando-se as curvas tempo-tensão-deformação até o valor correspondente a carga nula, determinou-se um ponto que se acredita ser representativo da verdadeira origem dos deslocamentos, conforme assinalado no gráfico.

Conforme já foi dito anteriormente, o carregamento a cada estágio manteve-se constante, como também que a velocidade de ensaio foi tal que acredita-se válida a hipótese de carregamento não drenado. Portanto, cada estágio foi um período de fluência ("creep") não drenado.

A análise do comportamento tempo-deslocamento já foi feita no item V.2.2. Uma análise mais completa deste fenômeno, segundo a teoria de Mitchell, não foi possível para os ensaios neste tirante, em virtude da forma pela qual foram executados, pois visavam principalmente ao estudo da característica tensão-deformação e capacidade de carga.

Juntamente com as curvas de carregamento, encontra-se tracejado uma reta com a inclinação da tangente a curva de descarregamento obtida nos ensaios do tirante S-1 tipo I. Como os tirantes utilizados nesta pesquisa são semelhantes, acredita-se na representatividade desta reta para os tirantes tipo I em geral.

Na Figura V.66 encontram-se os diversos ensaios de descarregamento realizados no tirante S-1 tipo I. Como



é visto na curva do "ensaio F" realizado com maior número de pontos, o comportamento não é linear, verificando-se um acréscimo de deformabilidade com o descarregamento.

Estes tirantes (ver seção III.4), possuem o trecho livre com dimensões geometricamente bem definidas (12,5 metros) e, de acordo com a execução e verificação posterior, livres de influências de atrito ao longo do seu comprimento. Conhecido o módulo de elasticidade do aço ( $E = 2,1 \times 10^6$  Kgf/cm<sup>2</sup>) e a área da seção dos cabos (4 cm<sup>2</sup>, 8  $\phi$  8 mm), determinou-se a curva de descarregamento teórica representativa da parcela do aço, que é apresentada juntamente na Figura V.66 com as demais curvas experimentais. O comportamento é linear, como característico do aço no nível de tensão a que foi submetido neste ensaio.

A comparação das curvas teórica e experimental conduz à conclusão de que existe influência de fatores outros que não a simples redução de tensões do aço, no comportamento de descarga, talvez apresentando-se de forma significativa o movimento do bulbo nesta fase. Por este motivo, também apresenta-se, juntamente com as curvas tempo-tensão-deslocamento dos ensaios desse tirante S-5 tipo I esta curva teórica (em linha cheia), que é representativa da parcela teórica de alongamento do aço ao carregamento, bem como ao descarregamento.

O comportamento tensão-deslocamento foi razoavell

mente constante entre o 2º e 6º estágio (entre 20 e 59% da carga de ruptura) para o "ensaio A" de primeiro carregamento. O módulo médio tensão-deslocamento ( $M_s$ ) neste intervalo, descontado o alongamento do aço, segundo a curva teórica foi, para as leituras de 7, 15, 60, 120 e 300 segundos, igual a 6,40; 2,07; 1,64; 1,38; 1,28 Kgf/cm<sup>2</sup> por centímetro, respectivamente.

Segundo os resultados experimentais de laboratório (UU isotrópicos, amostras amolgadas) realizados por Vilela<sup>9</sup>, Figuras III.11 a III.15, a deformação principal maior ( $\epsilon_1$ ), a 95% da carga de ruptura da argila no qual foi fundado o tirante, é da ordem de 15%. Considerando a deformação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) nula, tem-se segundo a expressão (V.1):

$$\gamma = \frac{3 \epsilon_1 - \epsilon_v}{4} = \frac{3}{4} \epsilon_1 \quad (V.1)$$

que a distorção angular ( $\gamma$ ) é igual a 11,3%.

De acordo com a curva tensão-tempo-deslocamento do "ensaio A", Figura V.9, tem-se que, a 95% da carga de ruptura, o deslocamento total ( $\Delta$ ), descontada a deformação do aço, é igual a 0,35 cm.

Denominando ( $e$ ) a espessura do solo envolvente ao tirante submetido a ruptura tem-se que a distorção angular ( $\gamma$ ) desse material a um deslocamento ( $\Delta$ ) do tirante, Figura

V.12, é igual a:

$$\gamma = \frac{\Delta}{e} \quad (V.2)$$

Considerando um mesmo comportamento tensão-deformação para as amostras amolgadas de laboratório, e o material envolvente ao tirante no qual desenvolveu-se a ruptura (o qual acredita-se parcialmente amolgado, ver item V.2.2), tem-se pela expressão (V.2) que a espessura do solo envolvente ao tirante submetido a ruptura deve ter sido igual a 3 cm.

### V.3 ENSAIO COM O TIRANTE S-1 TIPO I

#### V.3.1 INTRODUÇÃO

Por se tratar de um tirante tipo I, com grande rigidez estrutural do bulbo em relação ao solo circunvizinho (ver seção III.3), acredita-se que durante o carregamento, as tensões desenvolvidas ao longo do fuste do mesmo tenham tido uma distribuição razoavelmente uniforme.

Em virtude da baixa capacidade de dissipação de poro-pressão do material em que se localiza o bulbo do tirante, uma argila orgânica com coeficiente de consolidação da ordem de  $10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s, acredita-se poder-se considerar como não drenados os ensaios de duração não muito longa.

Para ensaios (ou estágios) que sejam mantidos em carregamento por longos períodos, como, por exemplo, o terceiro estágio de carga do ensaio de primeiro carregamento, com 78 dias de duração, a drenagem já é significativa, acarretando variações sensíveis de umidade e índice de vazios, e consequentemente modificação das características mecânicas do material de fundação e do comportamento do tirante, como ficou evidente nos resultados obtidos. Entretanto, da mesma forma dos demais ensaios de menor duração, até determinado período após o início de cada estágio, função do montante de dissipação de pressão neutra, é válida a consideração dos mesmos como ensaios não-drenados.

Um primeiro ensaio foi realizado em estágios de carregamento constante até a ruptura; o período de manutenção de cada estágio foi razoavelmente longo (5 a 80 dias).

Findo o ensaio, após descarregar-se o tirante, um novo ensaio teve início, logo em seguida, em estágios de 1 minuto de duração até a ruptura.

Em seguida foram feitos ensaios de recarregamento, sempre se aliviando o carregamento após cada ruptura. Os períodos de manutenção de cada ensaio dessa série foram tambem razoavelmente longos, visando ao estudo do comportamento tensão-deslocamento-tempo.

Terminada esta segunda fase de ensaios, foi fei

to um novo ensaio em estágios de carregamento constante, até a ruptura, com estágios de 1 minuto de duração similar ao ensaio realizado após a primeira ruptura.

Com vistas à melhor definição do comportamento tensão-deslocamento no descarregamento, cinco meses após o último ensaio, novos ensaios foram realizados. O descarregamento foi realizado em diversas etapas de modo a melhor definir a conformação da curva.

Este tirante é em tudo semelhante ao anterior S-5 tipo I. Acredita-se que as diferenças de comportamento verificadas entre este ensaio e o anterior resultaram basicamente do plano diverso de ensaio.

#### V.3.2 ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO

Os ensaios neste tirante foram iniciados 114 dias após sua execução.

Foi aplicado inicialmente um carregamento efetivamente atuante de 269 Kgf, correspondendo a 20% da carga de primeira ruptura (1334 Kgf) do ensaio do tirante S-5 tipo I; o período de duração deste estágio foi de 5 dias.

No sexto dia a carga foi acrescida de 234 Kgf (17,5% da carga de primeira ruptura do tirante S-5 tipo I) e

mantida por 7 dias. Um novo estágio iniciou-se no décimo terceiro dia com um acréscimo de carregamento de 489 Kgf (36,6%), mantido durante um período de 78 dias.

Os demais estágios tiveram um dia de duração cada, os acréscimos de carga foram, respectivamente, 227 Kgf (17%); 228 Kgf (17%) e 458 Kgf (34%) atingindo-se a ruptura brusca no último estágio após 67 minutos.

Os estágios desse ensaio receberam pela ordem a numeração de I a VI.

Devido a influências diversas no sistema de carregamento (provenientes do atrito no êmbolo do macaco, acréscimos de temperatura etc), a carga aplicada ao tirante não se manteve rigorosamente constante, fazendo com que o carregamento ao final de cada estágio diferisse do inicialmente aplicado. Estas diferenças de cargas para cada estágio representaram, respectivamente, acréscimos de 36 Kgf, 28 Kgf, 109 Kgf, 47 Kgf e 60 Kgf, e um decréscimo de 14 Kgf no último estágio, representando cada uma dessas variações um percentual de 13%, 12%, 22%, 21%, 26% e menos 3% em relação ao acréscimo de carregamento no início do estágio correspondente.

As cargas ao final de cada estágio foram de 305 Kgf (23%), 567 Kgf (42,5%), 1164 Kgf (87%), 1438 Kgf (107%), 1726 Kgf (129,3%), 2170 Kgf (162,6% da carga de primeira

ruptura do ensaio do tirante S-5 tipo I).

Nas Figuras V.13a a V.18, encontram-se representadas, em escala log-normal, as curvas tempo-deslocamento juntamente com as curvas recalque da placa de referência-tempo e carga-tempo em escala log-normal. Todas as leituras de deslocamento apresentadas estão referidas à extremidade superior do trecho livre, em relação a uma placa de superfície afastada da área de teste. Realizou-se simultaneamente o acompanhamento do recalque regional originário do rebaixamento na área, desta forma se permitindo uma correta definição do nível de referência (ver item IV.3.1).

A variação do valor do carregamento dentro de cada estágio (ver curvas carga-tempo) foi relevante somente após decorrido algum tempo do ensaio, permitindo para cada estágio a definição do comportamento tempo-deformação sob carga constante, conforme se discute no item V.3.6.1.

Os resultados deste ensaio para cada estágio foram plotados em gráficos "tempo elevado a menos 1,118" versus deslocamento ( $t^{-1,118} \times \Delta$ ), obtendo-se retas ao ligarmos seus pontos, a menos do último estágio (no qual se atingiu a ruptura) e do segundo (possivelmente com problemas), Figuras V.19 e V.20.

Através destas retas traçaram-se curvas, denominadas teóricas, as quais se encontram representadas em trace

jado juntamente com os pontos experimentais nas Figuras V.13a e V.16b.

Na Figura V.21 encontra-se representada a curva tensão-deslocamento desse ensaio. As lacunas são períodos de ensaio com significativa variação do carregamento com seus deslocamentos correspondentes, dificultando, devido à sua aleatoriedade, sua representação.

Nas Figuras V.22 e V.23, respectivamente, resume-se este ensaio, numa curva tempo-deslocamento-tensão traçada segundo o princípio da superposição dos efeitos, englobando as deformações instantâneas do aço, e na escala log x log a curva tempo versus velocidade de deslocamento.

As curvas tempo (t) versus velocidade de deslocamento ( $\dot{\Delta}$ ) em seus trechos iniciais retilíneos foram definidas matematicamente através da expressão,

$$\dot{\Delta} = - 1,118 C_1 t^{-2,118} \quad (V.3)$$

Sendo  $C_1$  o coeficiente angular da reta obtida no gráfico deslocamento versus tempo elevado a menos 1,118 ao ligarmos os pontos experimentais.

Na curva tensão-tempo-deslocamento, os trechos em tracejado representam o acréscimo de carregamento ocorri



do durante cada estágio. Estes acréscimos, como já salientado anteriormente, não se desenvolvem no período inicial do ensaio, não interferindo, portanto, na definição destas curvas, que são referentes aos primeiros 5 minutos de ensaio. Entretanto, sua representação no gráfico se faz necessária para a correta definição do nível de carregamento.

Semelhantemente ao tirante S-5 tipo I, analisando o formato da curva tensão-deslocamento-tempo do ensaio de primeiro carregamento verifica-se um deslocamento no primeiro estágio discrepante relativamente aos demais. Da mesma forma do tirante anterior, acredita-se que parte deste deslocamento seja originário de acomodações e desentortamento dos cabos. Por este motivo, prolongando-se as curvas tempo-tensão-deslocamento até o valor correspondente a carga nula, determinou-se um ponto que se acredita ser representativo da verdadeira origem dos deslocamentos, conforme assinalado no gráfico.

O segundo estágio deste ensaio, como pode ser verificado em todas as curvas citadas, apresentou-se com problemas. Possivelmente a aplicação do carregamento neste estágio não foi imediata, concorrendo para que parte da deformação dos fios de atirantamento fosse atribuída ao movimento do bulbo.

V.3.3 ENSAIOS DE RECARREGAMENTO

Atingida a ruptura, o tirante foi descarregado, e imediatamente submetido a carregamento em estágios de acrêscimos de carga. A carga efetivamente aplicada em cada estágio foi de, respectivamente, 1654 Kgf, 1783 Kgf, 1920 Kgf e 2056 Kgf (154% da carga de ruptura do tirante S-5 tipo I) atingindo a ruptura brusca em período inferior a 1 minuto no último estágio. O período de duração dos demais foi de 1 minuto.

Aliviando-se a carga no tirante, para o valor de 100 Kgf, no dia seguinte um segundo ensaio teve começo, em dois estágios. O primeiro iniciou-se com um carregamento de 1419 Kgf, terminando, devido à variação de carga durante o estágio, após um dia com um total de 1434 Kgf, quando então a carga foi novamente incrementada, perfazendo o total de 1646 Kgf, dando início ao segundo estágio. Após este segundo acrêscimo, grandes deslocamentos foram assinalados embora não se tenha atingido a ruptura brusca.

Este ensaio recebeu a denominação de ensaio de recarregamento "A", designando-se de A.1 e A.2, respectivamente, os 1º e 2º estágios.

Ao término do ensaio anterior, a carga no tirante foi reduzida para o valor de 59 Kgf. Realizou-se no dia seguinte novo ensaio, com um carregamento de 697 Kgf, mantido

do pelo período de 12 minutos. Ao término do mesmo, o ensaio foi interrompido e o tirante descarregado para 69 Kgf.

A este ensaio deu-se a denominação de ensaio de recarregamento "B".

Passados dois dias, iniciou-se outro ensaio. A um primeiro estágio, cuja carga variou entre 696 Kgf (inicial) e 728 Kgf (final), sucedeu-se outro, iniciado com 1120 Kgf e terminado com 1134 Kgf, e um terceiro (1511 Kgf e 1445 Kgf). Os dois primeiros estágios tiveram a duração de um dia, e o terceiro foi interrompido após 7 horas e 17 minutos de iniciado, com grandes deformações. Findo o terceiro estágio, o tirante foi totalmente descarregado.

Este ensaio recebeu a denominação de ensaio de recarregamento "C", representando-se por C-1, C-2 e C-3, respectivamente, os 1º, 2º e 3º estágios.

Sucedeu-se então uma série de ensaios, todos com a seguinte metodologia.

Após o carregamento, o tirante era mantido em ensaio por um período que variou, de ensaio para ensaio, entre 45 e 66 minutos, findo o qual se procedia ao descarregamento, iniciando-se novo ensaio no dia seguinte.

A este grupo de ensaios deu-se a denominação de

ensaios de carregamento D, representado por D-1, D-2, D-3, D-4, D-5, D-6, D-7 e D-8, respectivamente, os 1º, 2º, 3º, 4º, 5º, 6º, 7º e 8º ensaios.

Os ensaios realizados a cada dia, tiveram conforme a tabela abaixo, os seguintes carregamentos.

| Ensaio | (*)<br>Carga<br>residual<br>(Kgf) | (**) CARGA DE ENSAIO |                  |                              |
|--------|-----------------------------------|----------------------|------------------|------------------------------|
|        |                                   | Início<br>(Kgf)      | Término<br>(Kgf) | % de<br>variação<br>de carga |
| D-1    | -75                               | 734                  | 709              | -3%                          |
| D-2    | -16                               | 1007                 | 1007             | zero                         |
| D-3    | -34                               | 1254                 | 1187             | -5%                          |
| D-4    | -41                               | 800                  | 833              | 4%                           |
| D-5    | -16                               | 1065                 | 1046             | -2%                          |
| D-6    | - 9                               | 1075                 | 1039             | -3%                          |
| D-7    | -16                               | 934                  | 914              | -2%                          |
| D-8    | -18                               | 936                  | 929              | -1%                          |

(\*) Carga residual - carregamento pré-existente no tirante antes do início dos ensaios (O valor negativo é oriundo do carregamento atuante ser inferior ao peso próprio do tirante e bulbo de ancoragem).

(\*\*) Carga de ensaio - carregamento atuante no tirante durante o ensaio.

Semelhantemente ao segundo estágio do ensaio de primeiro carregamento, o ensaio de recarregamento "D-1" apresentou problemas. Da mesma forma que o segundo estágio do ensaio de primeiro carregamento, acredita-se que neste ensaio a aplicação do carregamento também não foi imediata.

Terminada a série de ensaios anterior, um outro ensaio foi iniciado, semelhantemente a estes, atingindo-se posteriormente a ruptura, através de estágios de acréscimo de carregamento. A carga pré-existente no tirante tinha o valor de -31 Kgf. A um carregamento inicial de 917 Kgf a cresceram-se outros, perfazendo, respectivamente, os totais de 1213 Kgf, 1481 Kgf e, finalmente, 1650 Kgf (124% da carga "primeira" de ruptura do tirante S-5 tipo I), atingindo-se então a ruptura brusca, num período inferior a 6 segundos do início deste estágio. O tempo de cada um dos estágios anteriores à ruptura, com exceção do primeiro, de 39 minutos, foi de 1 minuto cada. Os carregamentos durante todos os estágios, mantiveram-se constantes.

Este ensaio recebeu a denominação de ensaio de recarregamento "E", representando-se por E-1, E-2, E-3 e E-4, respectivamente, os 1º, 2º, 3º e 4º estágios.

Da Figura V.24 a Figura V.35 encontram-se representadas as curvas tensão-deslocamento para a série A, B, C, D, E de recarregamento.

As curvas tempo-deslocamento juntamente com as curvas recalque do nível de referência-tempo e carga-tempo em escala log-normal, são apresentadas para a série A, B, C, D, E de ensaios de recarregamento na Figura V.36a a Figura V.50, e os gráficos tempo elevado a menos 1,118 versus deslocamento na Figura V.52 a Figura V.56.

Na Figura V.51 encontram-se reunidos os estágios do "ensaio E", numa curva tempo-deslocamento em escala log-normal.

Da Figura V.57 a Figura V.60, respectivamente são apresentadas as curvas tempo-deslocamento-tensão englobando as deformações instantâneas de aço para cada grupo A, B, C, D, E de ensaios de recarregamento. As curvas dos ensaios em estágios foram traçadas, utilizando-se o princípio da superposição de efeitos.

Nas Figuras V.61 e V.62, resume-se toda esta sêrie de ensaios de recarregamento nas curvas tempo versus velocidade de deslocamento, em escala log x log, e carga versus velocidade de deslocamento em escala normal-log.

Com vistas à melhor definição do comportamento de descarga, 5 meses após o término da série de ensaios descrita, um novo ensaio foi efetuado. A carga prê-existente no tirante tinha o valor -75 Kgf. Inicialmente um carregamento em quatro etapas foi aplicado, perfazendo um total de

292 Kgf, 687 Kgf, 1246 Kgf e 1482 Kgf em cada estágio, todos com 10 minutos de duração. No último estágio, o carregamento sofreu variações devidas ao sistema, finalizando com um total de 1458 Kgf.

Findo o último estágio, um período de "relaxação" de tensões teve início com o fechamento da torneira do equipamento gerador de pressão, não se permitindo desta forma que a perda de carga fosse compensada, além de impedir o movimento do êmbolo do macaco e consequentemente da extremidade superior do trecho livre (este período propriamente não foi de relaxações de tensões, devido ao movimento do bulbo simultaneamente ao encurtamento dos cabos pelo decréscimo de tensões no aço). Estabilizada completamente a queda de tensões durante o período de "relaxação" (aproximadamente 20 minutos), que concorreu para a redução no valor do carregamento de 1458 Kgf para 1200 Kgf, a carga foi paulatinamente aliviada, em diversas etapas, até 5 Kgf.

Imediatamente ao final do descarregamento, um segundo carregamento teve início. A um primeiro estágio cuja carga variou entre 1616 Kgf (inicial) e 1547 Kgf (final), sucedeu-se outro, iniciado com 1715 Kgf e terminado com 1695 Kgf e, finalmente outro 1728 Kgf (129% da carga de primeira ruptura do tirante S-5 tipo I) atingindo a ruptura num período inferior a 30 segundos. Os primeiro e segundo estágios foram mantidos, respectivamente, por 10 e 7 minutos. Entre os 1º e 2º, 2º e 3º estágios, houve períodos de relaxação de

tensões em que a carga reduziu-se de 1547 Kgf para 1365 Kgf, e de 1695 Kgf para 1533 Kgf, não se tendo em nenhum dos dois casos esperado a estabilização total.

Este ensaio foi denominado ensaio de recarregamento "F", designando de F-1, F-2, F-3, F-4, respectivamente, os 1º, 2º, 3º e 4º estágios da primeira etapa de carregamento e F-5, F-6 e F-7, os da segunda.

As curvas tempo-deslocamento deste ensaio encontram-se apresentadas nas Figuras V.63a e V.63b, e as curvas tensão-deslocamento em escala log-normal nas Figuras V.64a e V.64b.

Na Figura V.65 é apresentada a curva tempo-tensão-deslocamento da primeira etapa de carregamento desse ensaio.

#### V.3.4 CAPACIDADE DE CARGA

Conforme exposto no item V.3.2, no sexto estágio, num carregamento de 2184 Kgf, após 67 minutos do início do estágio e 92 dias do início do carregamento, ocorreu ruptura brusca, num ensaio de primeiro carregamento com estágios de carga constante, com o tirante S-1 tipo I. A tensão média de ruptura, ao longo do fuste, para a área lateral 5755 cm, foi de 0,38 Kgf/cm<sup>2</sup>. Comparando com o valor da carga de



ruptura do tirante S-5 tipo I (item V.2.2), de dimensões e forma de execução idêntica, 1334 Kgf, constata-se um acrêscimo de 850 Kgf, representando 64% da carga de ruptura desse segundo ensaio.

A carga de ruptura do ensaio de recarregamento, realizado logo após, em quatro estágios de 1 minuto de duração, foi de 2056 Kgf. O valor da tensão média de ruptura foi de 0,36 Kgf/cm<sup>2</sup>. Comparando com o valor da carga de ruptura do ensaio de recarregamento do tirante S-5 tipo I, 925 Kgf, consta-se um acrêscimo de 1137 Kgf, representando 118% da carga de ruptura desse segundo ensaio.

Sabe-se da influência do tempo de ensaio na resistência ao cisalhamento dos solos. Considerando-se que um solo submetido a um dado carregamento atinge a ruptura em um tempo determinado, sabe-se que, de maneira geral, existirá uma série de carregamentos inferiores a este que também o levarão à ruptura, em tempo tanto maior quanto menor o valor deste carregamento, no caso de ensaios não drenados. (No caso dos ensaios em questão, os estágios respectivos que concorreram para a ruptura foram de curta duração, relativamente ao tempo necessário à dissipação de pressões neutras num solo como este de baixo coeficiente de adensamento; portanto, é válido considerá-los como não-drenados).

De acordo com o exposto acima, temos que a diferença de capacidade de carga (64%) entre os ensaios de pri

meira ruptura dos tirantes S-1 e S-5 tipo I, ainda seria maior, caso os tempos de ruptura dos estágios finais dos dois tirantes fossem iguais, pois enquanto no tirante S-1 esta ocorreu a 67 minutos do início do acréscimo que o levou à ruptura, no tirante S-5 deu-se em apenas dois minutos. Entretanto, o inverso seria verificado em relação à capacidade de carga dos ensaios de recarregamento, cuja a diferença de 118% seria reduzida em virtude de o tempo de ruptura do ensaio do tirante S-1 ter sido inferior a um minuto, enquanto a do tirante S-5 foi de 3 minutos.

Uma hipótese que explicaria a diferença de capacidade de carga entre esses dois tirantes semelhantes, é a dissipação da poro-pressão induzida ao momento da aplicação dos diversos carregamentos e pelo próprio fenômeno de fluência, mais efetiva no tirante S-1 tipo I, em virtude do maior tempo de ensaio.

O tirante S-1 foi submetido a estágios crescentes de carregamento, até a ruptura, por 92 dias. Durante estes estágios, principalmente o terceiro que teve a duração de 78 dias, parte da poro-pressão teria se dissipado, concorrendo para redução do índice de vazios inicial, simultaneamente ao aumento da pressão efetiva.

Esta dissipação de poro-pressão se daria ao longo de todo o período. Se bem que talvez irrisória em um pequeno intervalo, por exemplo, no período inicial de um está

gio, pode ser bastante significativa no final, concorrendo em aumento de capacidade de carga.

Esta hipótese parece ser reforçada, com a análise do comportamento tensão-tempo-deslocamento realizada no item V.3.6.

De acordo com o já exposto no item V.2.2, sobre o aparecimento de forças de sucção na base de tirantes estabelecidos em solos de baixa capacidade de dissipação da poro-pressão, uma parcela de no máximo 9,4% e 10%, respectivamente, pode ser creditada a tais esforços, nos valores determinados para a capacidade de carga de primeiro carregamento, 2184 Kgf e, de recarregamento, 2056 Kgf, já que seu valor limite é de 206 Kgf para a secção transversal desse bulbo, com 103 cm de área.

Terminando as primeiras séries de ensaios de recarregamento, realizou-se um ensaio em quatro estágios (ensaio "E"). O primeiro mantido por 39 minutos, seguindo-se 2 de 1 minuto de duração, rompendo-se finalmente no quarto em período inferior a 6 segundos. O valor de carga de ruptura foi de 1650 Kgf. Com relação ao ensaio de recarregamento do tirante S-5 tipo I, 925 Kgf, o valor deste carregamento foi superior em 725 Kgf, representando um acréscimo de 78%.

Comparando este ensaio com o efetuado logo após a ruptura do ensaio de primeiro carregamento, cujo valor foi

de 2056 Kgf, verifica-se um decrêscimo de 406 Kgf (20% deste primeiro ensaio de recarregamento), embora, em ambos, a ruptura tenha se processado em períodos semelhantes.

O ensaio citado acima aparentemente contradiz a hipótese, apresentada anteriormente, do ganho de resistência com o tempo em virtude da dissipação lenta de acrêscimo de poro-pressão. Entretanto neste caso a situação é diversa. Em sua maioria os ensaios desta fase, os do grupo "D" realizados um a cada dia, eram mantidos em carga por pequeno período de tempo, processando-se o descarregamento, mais ou menos 45 minutos após o início do carregamento.

Em período tão curto, a drenagem possivelmente era irrisória. O que também pode-se esperar na fase de descarregamento de relativamente pequena duração.

Em vista disto, a cada ensaio uma parcela de pressão neutra era acrescida, somando-se às anteriores, acumulando-se em valores crescentes, em virtude da pequena dissipação.

Da mesma forma estas considerações são válidas para os demais ensaios realizados nesta fase (A,B,C) de 1 dia, 12 minutos e 2 dias de duração.

Este processo concorreu em decrêscimo da pressão efetiva, pelo acrêscimo da pressão neutra, reduzindo a resis

tência ao cisalhamento do solo envolvente ao bulbo do tirante, promovendo a ruptura do tirante a um carregamento inferior neste último ensaio ("ensaio E") relativamente ao primeiro realizado logo após ao término do ensaio de "primeiro" carregamento.

Este fenômeno, já verificado em ensaios normais de laboratório, de carga e descarga, parece ter-se salientado também para o caso destes tirantes.

Esta hipótese parece reforçar-se na análise do comportamento tensão-velocidade de deslocamento realizada no item V.3.6.3.

Cinco meses após o término da série inicial de ensaios de recarregamento, novo ensaio (ensaio de recarregamento "F") foi iniciado. Após um carregamento realizado em quatro estágios de 10 minutos de duração cada, seguiu-se um período de relaxação de tensões (20 minutos) e descarregamento. Imediatamente ao descarregamento um novo ensaio foi aplicado em três estágios, os dois primeiros de 10 e 7 minutos de duração atingindo-se a ruptura no último a menos de 30 segundos do seu início. O valor da carga de ruptura foi 1728 Kgf, representando um acréscimo de 78 Kgf (5%) em relação ao último ensaio da série de recarregamento (ensaio de recarregamento "E") cujo valor foi de 1650 Kgf.

Este acréscimo de resistência ao longo de 5 me

ses possivelmente deve sua origem ao ganho tixotrópico do material, além de dissipação de poro-pressões neste período.

Levando em consideração a forma de ruptura desses dois ensaios ("E" e "F") acredita-se que as diferenças de capacidade de carga ainda seriam maiores, caso esta fosse relativa a ensaios semelhantes em tempo e metodologia.

Com relação a superfície provável de ruptura, ver item V.2.2, onde são feitas considerações para o tirante S-5 tipo I.

#### V.3.5 SENSIBILIDADE

Conforme definida no item V.2.3, a sensibilidade pode ser expressa por:

$$S = R_I / R_{II}$$

sendo:

$R_I$  - resistência à "primeira ruptura", conforme definida no item V.2.2.

$R_{II}$  - resistência ao recarregamento.

Para o caso do tirante em pautas, ensaiado da forma descrita, a sensibilidade foi de 1,06.

O valor numérico fornecido pela expressão da sensibilidade, pretende-se representar a perda de resistência devida à modificação estrutural pelas forças cisalhantes; isto é, o amolgamento do material de fundação.

Entretanto, conforme discorrido no item V.3.4 a resistência à ruptura é função da velocidade da deformação. Daí, uma definição mais apropriada ao que se pretende, deveria levar em consideração o tempo de ruptura.

Nos ensaios do tirante S-1 tipo I, o tempo de ruptura dos ensaios de primeiro carregamento, e recarregamento realizado logo a seguir, foram bem diversos, respectivamente, 67 minutos e inferior a 1 minuto. O que não ocorreu nos ensaios do tirante S-5 tipo I, em que o tempo de ruptura de primeiro carregamento e recarregamento foram, respectivamente, 3 e 2 minutos.

Portanto, segundo as considerações apresentadas, a razão entre as cargas de ruptura dos ensaios de primeiro carregamento e recarregamento do tirante S-1 tipo I, 1,06, cresceria caso os valores das tensões que conduziram o tirante nos dois ensaios à ruptura, fossem de magnitude tal capaz de promove-la a intervalos de tempos iguais.

No segundo ensaio de recarregamento do tirante S-1 tipo I realizado no dia seguinte, em dois estágios de carga de, respectivamente, 1413 Kgf e 1646 Kgf, o primeiro

estágio teve a duração de 1265 minutos e o segundo foi interrompido após 121 minutos. Embora neste ensaio não se tenha atingido a ruptura brusca, após o incremento do segundo estágio, grandes deformações se fizeram sentir.

Baseando-se nesses dois ensaios tem-se que a carga correspondente à ruptura brusca num período de 67 minutos, deve estar compreendida entre os valores de 2056 Kgf do primeiro ensaio e 1646 Kgf do segundo ensaio de recarregamento.

Desta forma o valor da sensibilidade levando-se em consideração o igual tempo de ruptura, deve estar compreendida entre 1,06 e 1,33.

Comparando-se esta faixa com o valor da sensibilidade obtida no ensaio do tirante S-5 tipo I, que teoricamente, baseando-se nas considerações anteriores, seria um pouco maior, em vista dos diferentes tempos de ruptura de  $R_I$  e  $R_{II}$ , 2 e 3 minutos, respectivamente, verifica-se, ainda assim, ser esta superior àquele intervalo.

Como a sensibilidade é um índice relativo ao grau de modificação estrutural, isto é o amolgamento, pode-se levantar a hipótese de que simultaneamente ao acréscimo de capacidade de carga no ensaio de primeiro carregamento do tirante S-1, pela provável dissipação de poro-pressão, hipótese apresentada no item V.3.3, uma ação de efeito contrário



processou-se tendendo a reduzi-la. As deformações lentas devidas a um longo ensaio de carga-constante, gradualmente promoveram uma modificação do arranjo estrutural das partículas do solo circunvizinho, orientando-as segundo a solicitação dos esforços cisalhantes, e, em consequência, promovendo um maior amolgamento do solo desta região, como fica salientado na redução do valor da sensibilidade relativamente ao ensaio do tirante S-5 tipo I, de pequeno período de duração.

### V.3.6 COMPORTAMENTO TENSÃO-TEMPO-DESLOCAMENTO

#### V.3.6.1 Comportamento Tempo-Deslocamento

O comportamento tensão-tempo-deslocamento foi basicamente similar, quer para os ensaios de primeiro carregamento como para os de recarregamento.

Os diversos ensaios, com exceção do segundo estágio do ensaio de primeiro carregamento, do ensaio de recarregamento "D-1", além daqueles nos quais a ruptura foi atingida, ajustaram-se a curvas do tipo:

$$\Delta = C_1 t^{-1,118} + C_2$$

sendo:

$\Delta$  - deslocamento;

$t$  - tempo;

$C_1$  e  $C_2$  - constantes.

Estas curvas teóricas estão apresentadas, em traçado, juntamente com os pontos experimentais tempo versus deslocamento, em escala log-normal para cada ensaio ou estágio nos gráficos Figura V.13a à Figura V.17b e Figura V.36a à Figura V.50 e, em linha cheia, nos gráficos "tempo elevado a menos 1,118 versus deslocamento" das Figuras V.19 e V.20, e das Figuras V.52 à V.56, já apresentadas nos itens V.3.2 e V.3.3.

Verificou-se descontinuidade e falta de concordância entre alguns trechos dessas curvas e os pontos experimentais correspondentes.

Alguns dos trechos discordantes dessas curvas, correspondem a períodos nos quais simultaneamente verificou-se aumentos de carregamento durante o estágio, na maioria inferiores a 15% da carga de acréscimo inicial do ensaio ou estágio (ver curvas carga-tempo).

Noutros, principalmente no terceiro estágio do ensaio do primeiro carregamento, que foi mantido por maior período, 78 dias, a discrepância aparente deu-se em simultaneidade com o recalque regional, originário do sistema de rebaixamento na região, já que as medidas de deslocamento apresentadas na curva, têm como referência a superfície do terreno, que sofre variações de nível com este recalque.

A influência do recalque regional, principalmen

te, se faz significativa nos ensaios de longa duração como foi o caso do 3º estágio do ensaio de primeiro carregamento.

O acompanhamento deste recalque regional, realizado durante todo o período de ensaios, através de um tassômetro, Figuras IV.5 e IV.6, situado na mesma cota dos demais tirantes, permitiu o cômputo dessa participação (ver curvas recalque do nível de referência-tempo). Em um mesmo gráfico para cada ensaio ou estágio, apresentados nos itens V.3.2 e V.3.3, encontram-se as curvas teóricas do comportamento tempo-deslocamento; os pontos experimentais tendo como referência a superfície do terreno, além das curvas tempo-recalque regional (recalque da placa de referência), e tempo-carregamento (% de variação de carga), permitindo a análise conjunta, Figura V.13a a Figura V.18 e Figura V.36a a Figura V.50.

Entretanto, algumas dessas discrepâncias, não podem ser explicadas pelas razões expostas acima, não tendo sido constatado acrêscimo de carregamento, nem recalques regionais significativos, entre duas leituras de trechos não concordantes.

Uma hipótese plausível, caso estas leituras sejam defasadas por intervalos de tempo suficiente, é a de terem passado desapercebidos aumentos e diminuições no valor do carregamento. Foi verificado durante os ensaios, um aumento de carga nas horas de maior temperatura, concorrendo para minorar estes efeitos a proteção com uma cobertura, evi

tando-se desta forma a incidência direta da luz solar no sistema de carregamento.

Além das situações que se enquadram nas hipóteses acima, casos houve de, sob carga constante, o tirante sofrer um deslocamento em poucos segundos. Estes deslocamentos não podem ser explicados por nenhuma das considerações anteriores.

Poder-se-ia levantar duas hipóteses para explicar o ocorrido. Pela primeira, esses deslocamentos não seriam devidos ao tirante e sim ao recalque localizado na base do macaco hidráulico que serve como primeira referência das leituras. A segunda hipótese é a real existência de tais deslocamentos (súbitos) do bulbo do tirante.

A primeira hipótese é viável pois o equipamento de medida de deslocamento vertical utilizado para acompanhamento de recalque localizado, que em nenhum momento acusou qualquer deslocamento, tem acurácia de quatro centésimos de milímetro. Não foi constatado nenhum caso de deslocamento deste tipo (súbito) superior a este valor, não podendo desta forma ser medido pelo aparelho.

Em conformidade com a reologia dos solos, nos ensaios de carga constante não drenados (ensaios de fluência), o comportamento tempo-deformação, para níveis de tensões elevados a partir de dado instante pode modificar-se, passando

a velocidade de deformação a uma fase de aceleração, até finalmente ser atingida a ruptura.

Este comportamento foi verificado por Vilela<sup>9</sup>, nos ensaios de fluência de laboratório da argila, onde se encontra localizado o bulbo dos tirantes experimentais, Figuras III.29 à III.32.

Nos ensaios dos tirantes experimentais constatou-se comportamento similar. No 5º estágio do ensaio de primeiro carregamento, sob uma carga de 1666 Kgf (76% da carga de ruptura do ensaio), a velocidade de deformação a dado momento acelerou-se, entretanto, passados alguns instantes, uma desaceleração teve início, reconduzindo novamente o tirante a um comportamento similar ao da primeira fase do ensaio, Figuras V.17a e V.17b, Figura V.20 e Figura V.23.

Passando ao sexto estágio, a um carregamento de 2184 Kgf, o tirante imediatamente apresentou a fase acelerada; no entanto, da mesma forma que no 5º estágio, foi sucedida por uma fase de desaceleração, que por sua vez passado algum tempo, deu lugar a nova fase acelerada que finalmente levou o elemento a uma ruptura brusca, Figura V.18, Figura V.20 e Figura V.23.

O comportamento acima descrito também foi verificado em outros ensaios deste tirante.

O segundo ensaio de recarregamento ("ensaio A"), primeiro estágio ("A-1"), sob o carregamento de 1434 Kgf (70% da carga de ruptura do 1º ensaio de recarregamento) foi basicamente similar ao 5º ensaio de primeiro carregamento, Figuras V.36a e V.36b, Figura V.52, e Figura V.61.

No segundo estágio deste mesmo ensaio ("A-2"), sob um carregamento de 1646 Kgf (80% da carga de ruptura do 1º ensaio de recarregamento), verificadas também as fases alternadas do 6º ensaio de primeiro carregamento. Entretanto, em substituição à fase de reaceleração que conduziu no ensaio de primeiro carregamento o tirante a ruptura, neste estágio seguiu-se uma fase basicamente de velocidade de deformação constante, assim mantendo-se até o descarregamento que pôs fim ao ensaio, Figura V.37, Figura V.52 e Figura V.61.

Comportamentos basicamente similares a estes também foram verificados no 3º estágio ("C-3") do "ensaio C", com um carregamento de 1511 Kgf (73% da carga de ruptura do 1º ensaio de recarregamento), Figuras V.41a e V.41b, Figura V.53 e Figura V.61, nos 3º ("D-3"), 5º ("D-5") e 6º ("D-6") ensaios do grupo "D", com os carregamentos de 1254 Kgf, 1065 Kgf e 1075 Kgf (76%, 64%, 65% da carga de ruptura do ensaio de recarregamento "E"), Figuras V.44, V.54 e V.61; Figuras V.46, V.55 e V.61; Figuras V.47, V.55 e V.61.

Uma hipótese que poderia explicar o fenômeno é baseada na hipótese do desenvolvimento de forças de sucção

na base desses tirantes, já apresentada no item V.2.2, considerando-se serem estas forças função direta do deslocamento.

Desta forma, na iminência de ruptura, com o rápido acrêscimo de deslocamento tem-se de acordo com a hipótese acima, que também nesta situação rapidamente aumentam as forças de sucção, as quais funcionando como um elemento estabilizador podem chegar ao ponto de interromper o processo de ruptura, caso o decrêscimo da força resultante atuante no tirante, promovido pela ação das forças de sucção seja de valor suficiente.

No caso de ensaios ou estágios, cujo nível de tensão atuante, apresente-se longe da ruptura, a força de sucção em virtude da pequena velocidade de deslocamento apresenta-se, baseando-se na hipótese acima, maior constância, pois nestas condições seu desenvolvimento dar-se-ia principalmente no período inicial do acrêscimo de carregamento, no qual verificam-se relativamente, os maiores deslocamentos, devido às deformações imediatas ao carregamento e ao próprio processo de fluência mais intenso nesta fase.

Sumarizando tem-se, de acordo com esta hipótese, que a força de sucção pouco se modificaria, finda a fase inicial de carregamento, nos ensaios cujo nível de tensão fosse inferior a faixa de ruptura. Enquanto nos ensaios cujo nível de tensões estivesse perto do de ruptura, esta ao iniciar-se promoveria um grande acrêscimo da força de sucção, que

poderia ou não interromper o processo.

#### V.3.6.2 Comportamento Tensão-Deslocamento

Na Figura V.22 apresentam-se as curvas tempo-deslocamento-tensão, reunindo os estágios do ensaio de primeiro carregamento, englobando as deformações do aço.

Das Figuras V.57 a V.60 e Figura V.65, são apresentadas as curvas tempo-deslocamento-tensão reunindo-se os diversos estágios e/ou ensaios de recarregamento, englobando as deformações do aço.

Já foi dito anteriormente, que o carregamento a cada estágio ou ensaio manteve-se constante e que o período de ensaio considerado para o traçado dessas curvas (5 minutos) foi tal que se acredita, neste período, válida a hipótese de carregamento não drenado, para cada estágio e/ou ensaio isolado. Portanto, nestas condições, cada estágio ou ensaio isoladamente pode ser considerado um período de fluência não drenada.

Juntamente com as curvas de carregamento, encontra-se em tracejado uma reta com inclinação da tangente à curva de descarga no ponto de máximo coeficiente angular. Na Figura V.66, apresentam-se os diversos ensaios de descarregamento realizados no tirante S-1 tipo I. Como é visto na curva do "ensaio F", realizado com maior número de pontos, o



comportamento não é linear, verificando-se um acréscimo de deformabilidade com o descarregamento.

Conforme comentado no item V.2.4, este tirante assim como os demais (ver seção III.4), possui o trecho livre, com dimensões geometricamente bem definidas (12,5 metros) e, de acordo com a execução e verificação posterior, livre de influência de atrito ao longo do seu comprimento. Conhecido o módulo de elasticidade do aço ( $E = 2,1 \times 10^6$  Kgf/cm<sup>2</sup>) e a área da seção dos cabos ( $4 \text{ cm}^2$ ,  $8 \phi 8 \text{ mm}$ ), determinou-se a curva de descarregamento teórica representativa da parcela de aço, que é apresentada na Figura V.66 juntamente com as demais curvas experimentais. O comportamento é linear como característico do aço no nível de tensões a que foi submetido neste ensaio.

A comparação das curvas teóricas e experimentais conduz à conclusão, conforme citado na análise do tirante S-5 tipo I, da influência de fatores outros que não a simples redução de tensões no aço, no comportamento de descarga, talvez apresentando-se de forma significativa o movimento do bulbo nesta fase. Por este motivo, apresenta-se juntamente com as curvas tempo-tensão-deslocamento destes ensaios esta curva teórica (em linha cheia), que é representativa da parcela teórica de alongamento do aço ao carregamento, bem como ao descarregamento.

Ao se analisar a curva tensão-deslocamento-tempo, do ensaio de primeiro carregamento, Figura V.22, verifica-se

um comportamento em seus primeiros estágios (1º, 2º e 3º es  
tágios) similar ao ensaio rápido do tirante S-5 tipo I, Figur  
ra V.9. Nesta fase inicial, principalmente para os perí  
odos de ensaio, correspondentes as primeiras leituras, verif  
ficou-se um decréscimo de estágio a estágio do coeficiente  
angular da curva de carregamento. Entretanto, do 3º para o  
4º estágio este coeficiente apresentou um aumento, voltando  
novamente a reduzir-se a cada estágio que se seguiu, atingindo  
a ruptura no 6º, a um valor de carregamento 64% superior  
ao ensaio rápido (tirante S-5 tipo I).

Os tempos de duração destes estágios foram diversos  
e longos, cinco, sete, setenta e oito dias, respectiva  
mente, para os 1º, 2º e 3º estágios, e um dia para cada um  
dos três estágios restantes (4º, 5º e 6º).

Uma explicação para o fenômeno pode ser apresenta  
da, baseando-se na hipótese apresentada no item V.3.4, da  
dissipação da poro-pressão induzida pelo acréscimo de tensões  
cisalhantes a cada estágio e pelo próprio desenvolvimento de  
fluência. O conseqüente adensamento do material que redun  
daria dessa dissipação, concorreria no aumento de capacidade  
de carga, conforme foi verificado (ver item V.3.4), além de  
promover a mudança do comportamento tensão-deformação, o que  
parece bem caracterizado principalmente após o terceiro e  
mais longo ensaio.

O comportamento das curvas tensão-deslocamento-

-tempo do ensaio de recarregamento foi basicamente similar ao dos ensaios no tirante S-5 tipo I, verificando-se um de crêscimo do coeficiente angular das retas tensão-deslocamento a cada tempo com o acrêscimo de carregamento.

### V.3.6.3 Comportamento Tensão-Velocidade Deslocamen- to e Tempo-Velocidade de Deslocamento

De acordo com a teoria de fluência, o comportamento velocidade de deslocamento-tensão para um dado acrêscimo é função direta do nível de tensão inicial, bem como da fração que este acrêscimo de carregamento representa em relação à carga de ruptura. Daí, concluindo tem-se que comportamento velocidade de deslocamento-tensão é função direta da carga de ruptura, ou seja, da capacidade de carga.

Em vista do apresentado acima, de acordo com a hipótese de aumento de capacidade de carga do tirante decorrente da dissipação da pressão-neutra apresentada anteriormente, tem-se em maior ou menor grau, comportamentos diversos, em relação à característica velocidade de deslocamento-tensão a cada estágio de um dado ensaio, e cada ensaio entre si, em virtude do aumento gradativo da capacidade de carga.

Analizando a curva velocidade de deslocamento-tempo, para os diversos estágios do ensaio de primeiro car

regamento, Figura V.23, observam-se diferenças entre o comportamento tensão-velocidade de deslocamento, principalmente entre antes e depois do terceiro estágio. As considerações apresentadas abaixo, ficaram ainda mais salientadas, na análise comparativa do comportamento tempo-velocidade de deslocamento do tirante S-1 tipo I e S-3 tipo I, realizada no final do item V.4.4.3.

Já no terceiro estágio notou-se um pequeno valor para a velocidade de deslocamento a cada tempo, comparativamente ao 1º estágio, cujo acréscimo de carga e nível de tensão inicial lhe foi bastante inferior, respectivamente 25 e 35,5% da carga de primeira ruptura do ensaio do tirante S-5 tipo I para o acréscimo de carga, e zero e 90% também em relação ao tirante S-5 tipo I, para o nível de tensões inicial.

Após o terceiro estágio, de grande tempo de defasagem em relação ao quarto (a maior defasagem entre estágios), este comportamento parece apresentar-se mais caracterizado. No acréscimo de carga de 16,5%, a uma tensão inicial de 110% da carga de ruptura do ensaio no tirante S-5 tipo I resultou um pequeno valor para a velocidade de deformação a cada tempo. Mesmo levando-se em consideração o menor acréscimo de carga nesse estágio, a velocidade de deslocamento está demasiadamente aquém das correspondentes aos estágios anteriores.

Ao quarto estágio, sucedem-se o quinto, um dia após, também com um acréscimo de carga de (16,5%), e o sexto,

no qual se atingiu a ruptura, um dia após o quinto (33,3%). Devido à rapidez de incremento de carga esperava-se minimizar uma possível dissipação do poro-pressão.

No quinto estágio, conforme o esperado, o valor da velocidade de deslocamento para cada tempo foi superior ao verificado no quarto, devido ao maior nível de tensões inicial, 110% e 130% respectivamente do valor da primeira ruptura do ensaio do tirante S-5 tipo I.

O sexto e último estágio, apesar de já corresponder a um processo de ruptura, desde a primeira leitura efetuada, conforme fica caracterizado na curva em análise, e representar um acréscimo de carga de, 33,3%, quase similar ao acréscimo do 3º estágio, 35,5%, e superior ao 1º estágio (27%), teve para a velocidade de deformação a cada tempo, um valor aquém dos observados naqueles dois estágios.

De acordo com a teoria da fluência, a curva tensão-velocidade de deslocamento para um dado tempo em escala normal-log, traduz-se por uma reta, com exceção das extremidades. Os ensaios de laboratório realizados por Vilela<sup>9</sup> neste material confirmam este comportamento, Figura III.26.

Para um ensaio em estágios, utilizando-se o princípio de superposição de efeitos empregado por Mitchell, é possível, conhecido o comportamento velocidade de deformação-tempo de cada incremento de carga, estabelecer-se curvas

correspondentes ao comportamento velocidade de deformação-tensão a cada tempo.

Entretanto, caso se desenvolva uma significativa dissipação de poro-pressão ao longo dos diversos estágios, devido ao tempo de ensaio, ter-se-ão simultaneamente variações gradativas na capacidade de carga e, consequentemente no comportamento tensão-velocidade de deformação ao longo dos mesmos. Desta forma, traçada a curva tensão-velocidade de deformação, a mesma não mais se comportaria linearmente e sim conforme uma curva de declividade decrescente.

Infelizmente, não se pode traçar uma curva tensão-velocidade de deslocamento, para o ensaio de primeiro carregamento do tirante tipo I, em virtude do comportamento discrepante do 2º estágio, Figuras V.14a e V.14b, e Figura V.19. Entretanto, o comportamento descrito acima, parece salientar-se neste ensaio, conforme as considerações apresentadas anteriormente.

Os três últimos estágios do ensaio de primeiro carregamento tiveram, conforme já dito, pequeno tempo de defasagem e, portanto, segundo a hipótese apresentada, menor dissipação de pressão neutra e, em consequência, maior constância da capacidade de carga. De acordo com estas considerações, é esperado um comportamento linear da curva tensão-velocidade de deslocamento entre estes estágios, se bem que

com inclinação diversa da correspondente à capacidade de carga original, modificada pela drenagem nos três primeiros estágios.

Procurou-se por tentativas, arbitrando valores para a velocidade de deslocamento no nível de tensões do terceiro estágio, traçar-se uma reta, que unisse os pontos representativos dos três últimos estágios em escala log-normal, utilizando o princípio de superposição de efeitos, Figura V.67. O coeficiente angular desta reta ( $\alpha'$ ) semelhante ao parâmetro  $\alpha$  (Mitchell), teve o valor de  $2,48 \log (\text{cm/min}) / \text{Kg/cm}^2$ .

A razão do procedimento acima, é que para localizar-se os pontos correspondentes a cada nível tensão de modo a traçar-se a curva velocidade de deslocamento-tensão do material, utilizando-se o princípio de superposição dos efeitos, é necessário o conhecimento dos estágios anteriores. Como durante os três primeiros estágios, o material sofreu mudanças de comportamento, ao início do quarto estágio, durante o quinto e o sexto, o material apresentava-se diverso do correspondente aos primeiros dias de ensaio. Portanto, os dados obtidos nesses primeiros estágios não poderiam ser utilizados, na determinação da reta tensão-velocidade de deformação correspondente ao material, nas novas condições em que este se encontrava durante estes últimos estágios.

A reta representativa do comportamento tensão-ve

locidade de deslocamento, dos ensaios de recarregamento, é apresentada na Figura V.62 em escala log-normal. O parâmetro  $\alpha'$  deste ensaio teve o valor de  $3,27 \log (\text{cm/mm}) \text{ Kg/cm}^2$ .

Inversamente ao ensaio de primeiro carregamento, a capacidade de carga do tirante durante estes ensaios de recarregamento decrescem. De acordo com os ensaios de carga rápida realizados antes e depois destes ensaios, o decrêscimo foi de 20%. A análise deste fenômeno já foi anteriormente realizada no item V.3.4.

A influência deste decrêscimo parece salientar-se na curva tensão-velocidade de deslocamento na disposição dos pontos experimentais correspondentes aos últimos ensaios, ensaios "D" e "E", que apresentaram uma tendência de alinhamento diversa da média dos demais ensaios. Entretanto, devido à variação da capacidade de carga ser pequena e processar-se de forma gradativa ao longo dos ensaios, não é possível uma correta definição dessas duas tendências.

Baseando-se em resultados experimentais, Mitchell, salienta ser o produto ( $\alpha D_{\text{max}}$ ) praticamente uma constante para um dado solo, não apresentando grandes variações com o índice de vazios do material. Um decrêscimo do índice de vazios (teor de umidade) concorreria para decrêscimo do parâmetro  $\alpha$  e aumento da tensão-desvio máxima,  $D_{\text{max}}$ , entretanto estas variações se compensariam mantendo a constância do produto.



Considerando como válida a constância do produto ( $\alpha D_{\max}$ ) para o comportamento de ruptura dos tirantes, quer em primeiro carregamento quer em recarregamento, tem-se que:

$$\alpha'_I / \alpha'_{II} = D_{II} / D_I = R_{II} / R_I \quad (V.4)$$

$\alpha'_I$  = parâmetro  $\alpha'$  do ensaio de primeiro carregamento.

$\alpha'_{II}$  = parâmetro  $\alpha'$  do ensaio de recarregamento.

$D_I$  = tensão-desvio máxima no ensaio de primeiro carregamento.

$D_{II}$  = tensão-desvio máxima no ensaio de recarregamento.

$R_I$  = capacidade de carga no ensaio de primeiro carregamento.

$R_{II}$  = capacidade de carga no ensaio de recarregamento.

Como:

$$R_{II} / R_I = 1/S \quad (V.5)$$

Tem-se que:

$$\alpha'_I / \alpha'_{II} = 1/S \quad (V.6)$$

Para o tirante S-1 tipo I, nas condições dos ensaios realizados, verificou-se que o valor da sensibilidade está compreendido entre 1,06 e 1,33 (item V.3.5).

Assim, teoricamente a relação  $\alpha'_I/\alpha'_{II}$ , de acordo com a expressão (V.6), deve situar-se entre 0,94 e 0,75.

De acordo com os resultados experimentais  $\alpha'_I = 2,48 \log (\text{cm/min})/\text{Kgf/cm}^2$  obtido para os três últimos estágios do primeiro carregamento, Figura V.67,  $\alpha'_{II} = 3,27 \log (\text{cm/min})/\text{Kgf/cm}^2$ , obtido nos ensaios de recarregamento, Figura V.62, a relação  $\alpha'_I/\alpha'_{II}$  experimental tem o valor de 0,757, portanto dentro da faixa teórica 0,94 e 0,75.

Acredita-se que o valor experimental  $\alpha'_{II}$ , seja um pouco superior ao correspondente às condições do material logo após a primeira ruptura, já que este parâmetro varia inversamente com a capacidade de carga, e esta sofreu redução ao longo dos ensaios de recarregamento (ver item V.3.4).

Já o parâmetro  $\alpha'_I$  e a faixa em que deve situar-se o valor da sensibilidade, estão melhor definidos, pois os últimos estágios de primeiro carregamento e nos primeiros ensaios de recarregamento nos quais foram obtidos estes parâmetros, deve ter sido mínima a variação das características mecânicas do material (além da originária do amolgamento gerado ao atingir-se a ruptura no ensaio de primeiro carregamento), devido à pequena dissipação de poro-pressão conseque

quente da pequena duração desse período de ensaios (ver item V.3.4).

Levando em consideração o exposto acima, conclui-se que a relação experimental  $\alpha'_I/\alpha'_{II}$ , tenderia a ser superior 0,76 caso durante os ensaios de recarregamento a capacidade de carga se mantivesse constante.

#### V.4 ENSAIO COM O TIRANTE S-3 TIPO I

##### V.4.1 INTRODUÇÃO

Por se tratar de um tirante tipo I, de grande rigidez estrutural do bulbo em relação ao solo circunvizinho (ver seção III.3), acredita-se que durante o carregamento as tensões desenvolvidas ao longo do fuste do mesmo tenham uma distribuição razoavelmente uniforme.

O tempo de ensaio desses tirantes foi estabelecido, com base na experiência acumulada nos ensaios anteriores, de modo a conseguir-se um mínimo de dissipação das pressões neutras num período de tempo suficiente para bem caracterizar o comportamento tempo-deslocamento-tensão.

O ensaio foi realizado em estágios de carregamento constante de um dia de duração cada um.

Este tirante, provavelmente devido a um problema

executivo (ver item III.4), sofreu um bloqueio de movimentos, evidente a partir do terceiro estágio. Em vista desse bloqueio o tirante não foi levado a ruptura, sendo interrompido o ensaio no sétimo estágio e descarregado. Dessa forma não foram efetuados ensaios de recarregamento.

Entretanto, acredita-se que os dados relativos aos primeiros estágios (1º, 2º e 3º), pouca ou nenhuma influência sofreram com o ocorrido.

#### V.4.2 ENSAIO DE CARREGAMENTO

O ensaio neste tirante foi iniciado 235 dias a p<sup>ós</sup> sua execução.

O carregamento foi executado em estágios de carga constante, acrescidos a cada dia.

O valor da carga efetivamente aplicada ao início de cada estágio foi de 264 Kgf (20%); 508 Kgf (38%); 908 Kgf (68%); 1158 Kgf (87%); 1424 Kgf (107%); 1859 Kgf (139%) e 2081 Kgf (156% da carga de ruptura do tirante S-5 tipo I).

Entretanto, a carga aplicada no início de cada estágio não se manteve rigorosamente constante (devido a influências no sistema, de carregamento; ver item V.3.2), sendo seu valor ao término de cada um, respectivamente de 269

Kgf (20%); 534 Kgf (40%); 931 Kgf (69%); 1195 Kgf (90%); 1505 Kgf (113%); 1877 Kgf (141%) e 2124 Kgf (159% da carga de ruptura do tirante S-5 tipo I.

Respectivamente, as variações de carregamento para cada estágio foram, 5 Kgf, 26 Kgf, 24 Kgf, 37 Kgf, 81 Kgf, 18 Kgf e 43 Kgf, representando cada uma um percentual de 1%, 10%, 6%, 16%, 36%, 5% e 20% em relação ao acréscimo de carregamento no início do estágio correspondente.

Nas Figuras V.68a a V.74b, encontram-se apresentadas as curvas tempo-deslocamento dos estágios desse ensaio, numerados de I a VII pela ordem de início, juntamente com curvas recalque da placa de referência-tempo e carga-tempo em escala log-normal, e nas Figuras V.75 e V.76 os gráficos "tempo elevado a menos 1,118 versus deslocamento"

$$(t^{-1,118} \times \Delta).$$

As variações de carregamento verificadas durante o estágio (ver curvas carga-tempo), salientaram-se somente após algum tempo do início do mesmo, permitindo dessa forma a definição satisfatória do comportamento tempo-deslocamento a carga constante, conforme será discutido no item V.4.4.1.

Na Figura V.77 encontra-se representada a curva tensão-deslocamento desse ensaio. As lacunas são períodos de ensaio com significativa variação do carregamento com seus

deslocamentos correspondentes, dificultando devido sua aleatoriedade sua representação.

Nas Figuras V.78 e V.79, resume-se este ensaio, numa curva tempo-deslocamento-tensão traçada segundo o princípio da superposição de efeitos, englobando as deformações instantâneas do aço e, na escala  $\log \times \log$ , a curva tempo versus velocidade de deslocamento.

Nas curvas tensão-tempo-deslocamento, os trechos tracejados representam a variação de carregamento ocorrido durante cada estágio. Este acréscimo, como salientado anteriormente, não se desenvolve no período inicial e, portanto, basicamente não interfere nesta curva, que é traçada com leituras de até 5 minutos. Entretanto, sua representação no gráfico se faz necessária, para a correta definição do nível de carregamento.

Semelhantemente ao tirante S-5 tipo I e S-1 tipo I, verifica-se na análise da curva tensão-tempo-deslocamento do ensaio de primeiro carregamento um deslocamento no primeiro estágio discrepante relativamente aos demais. Da mesma forma que nos tirantes anteriores, acredita-se que parte deste deslocamento seja originário de acomodações e desentortamento dos cabos. Por este motivo encontra-se assinalado no gráfico um ponto obtido pelo prolongamento das curvas tempo-tensão-deslocamento até a carga nula, o qual se acredita ser representativo da verdadeira origem dos deslocamentos.

Em procedimento igual ao adotado no tirante S-1 tipo I, as curvas tempo versus velocidade de deslocamento des se ensaio foram definidas nos seus trechos retilíneos inici ais matematicamente através da expressão (V.6) e do gráfico experimental deslocamento versus tempo elevado a menos 1,118. As curvas relativas aos estágios IV, V, VI e VII encontram-se representadas somente no seu trecho inicial retilíneo (em tracejado), em virtude da pequena representatividade das mes mas, resultante do comportamento do tirante nestes estágios ter sido significativamente influenciado por um elemento es tranho, como será visto adiante.

#### V.4.3 CAPACIDADE DE CARGA E SENSIBILIDADE

Por este ensaio não ter sido levado à ruptura de vido ao bloqueio, não se obtiveram valores para a capacidade de carga e sensibilidade.

#### V.4.4 COMPORTAMENTO TENSÃO-DESLOCAMENTO-TEMPO

##### V.4.4.1 Comportamento Tempo-Deslocamento

Aos diversos estágios, com exceção dos de nível de tensão elevado, ajustaram-se curvas do tipo

$$\Delta = C_1 t^{-1,118} + C_2 .$$

Estas curvas teóricas estão apresentadas, em traçado, juntamente com os pontos experimentais tempo versus deslocamento em escala log-normal nos gráficos das Figuras V.68a a V.70b, e, em linha cheia, no gráfico  $(t^{-1,118} \times \Delta)$ , Figura V.75, já apresentados no item V.4.2.

Como no ensaio realizado no tirante S-1 tipo I, verificam-se descontinuidades e falta de concordância entre alguns trechos dessas curvas e os pontos experimentais correspondentes.

Além das razões já apresentadas no item V.3.6, soma-se, neste caso, a possível influência do elemento bloqueante, principalmente nos últimos estágios.

Entretanto o comportamento tempo-deslocamento foi bem concordante de maneira geral com curvas do tipo citado, conforme é constatado nos gráficos das figuras acima citadas.

Nos estágios a maiores níveis de tensões, a partir do terceiro (73% da carga de ruptura do tirante S-5 tipo I), verificou-se comportamento tempo-deslocamento similar aos ensaios em iguais condições no tirante S-1 tipo I (ver item V.3.6).

Entretanto, em nenhum desses estágios atingiu-se a ruptura brusca, apesar dos elevados carregamentos aplicados. Em todos eles, ao período acelerado sucedeu-se outro



de desaceleração, com retorno definitivo a um comportamento "estável".

Este fenômeno já foi constatado nos ensaios do tirante S-1 tipo I (ver item V.3.6.1), tendo sido levantada a hipótese de o mesmo ser originário do desenvolvimento de forças de sucção na base; entretanto, no caso deste tirante, deve-se também considerar a influência do elemento bloqueante citado anteriormente.

#### V.4.4.2 Comportamento Tensão-Deslocamento

Na Figura V.78 apresentam-se as curvas tempo-deslocamento-tensão, reunindo-se os estágios do ensaio de primeiro carregamento, englobando as deformações do aço.

Já foi dito anteriormente que o carregamento a cada estágio manteve-se constante e que o período de ensaio foi tal (7 dias) que se acredita irrisória a dissipação da pressão neutra. Seria portanto válida a hipótese de carregamento não drenado, correspondendo a cada estágio um período de fluência não-drenada.

Juntamente com as curvas de carregamento, encontra-se representada, em tracejado pontilhado, uma reta com a inclinação da curva de descarregamento obtida no ensaio desse tirante, tendo sido o descarregamento efetuado em uma uni

ca etapa, Figura V.77.

Conforme consta do item V.3.6.2, verificou-se a travês dos ensaios no tirante S-1 tipo I que o comportamento de descarga nestes tirantes não é linear, Figura V.66, ocorrendo um acréscimo de deformabilidade com o descarregamento. Acredita-se que a este fator, para o caso do tirante S-3 tipo I, soma-se também a influência do elemento bloqueante, para o qual é esperada uma certa contribuição ao descarregamento em virtude de uma parcela de deformação elástica.

Esta participação elástica do elemento bloqueante parece ficar salientada na maior deformabilidade desse tirante ao descarregamento relativamente aos ensaios em condições similares no tirante S-1 tipo I, Figura V.80.

Pelos motivos apresentados acima, decidiu-se a apresentar juntamente com a reta de descarregamento desse ensaio, a obtida nos ensaios do tirante S-1 tipo I (em tracejado). Como os tirantes são semelhantes, acredita-se na representatividade dessa reta para o tirante em questão.

Este tirante, assim como os demais (ver seção III.4), possui o trecho livre com dimensões geometricamente bem definidas (12,5 metros), de acordo com a execução e verificação posterior, livres de influências de atrito ao longo do seu comprimento. Conhecido o módulo de elasticidade do aço  $E = 2,1 \times 10^6 \text{ Kgf/cm}^2$ , e a área da seção dos cabos ( $4 \text{ cm}^2$ ,

8  $\phi$  8mm), determinou-se a curva de descarregamento teórica representativa da parcela do aço, que ẽ apresentada em linha cheia juntamente com as curvas experimentais citadas. O comportamento desta curva ẽ linear como característico do aço no nível de tensão a que foi submetido neste ensaio.

Ao se analisar a curva tensão-deslocamento-tempo do ensaio de primeiro carregamento, Figura V.78, verifica-se um comportamento em seus três primeiros estágios similar ao do ensaio rápido do tirante S-5 tipo I, Figura V.9, e do S-1 tipo I, Figura V.22.

A partir desse estágio, apesar de todas as condições continuarem as mesmas (tempo de estágio, forma de carregamento etc), o que não ocorreu no tirante S-1 tipo I, o coeficiente angular da reta de carregamento sofreu acrêscimos, como pode ser verificado do 3º para o 4º estágio e do 6º para o 7º.

Este comportamento ẽ discrepante dos verificados nos ensaios anteriores, e com a característica dos solos em geral, levando a acreditar-se que a partir desse terceiro estágio o bloqueio passou a fazer-se sentir de forma efetiva.

#### V.4.4.3 Comportamento Tensão-Velocidade de Deslocamento e Tempo-Velocidade de Deslocamento

As curvas representativas do comportamento tensão-velocidade de deslocamento traçadas utilizando-se o princípio da superposição dos efeitos, encontram-se apresentadas na Figura V.81 em escala log-normal.

Os trechos destas curvas relativos aos IV, V, VI e VII encontram-se representados para as curvas relativas aos períodos de 6 e 12 segundos de ensaio, em tracejado, em virtude da pequena representatividade dos mesmos resultante do comportamento do tirante nestes estágios ter sido significativamente influenciado por um elemento estranho, como será debatido ao longo da seção.

Por serem os estágios realizados em um tempo relativamente pequeno (1 dia), esperava-se uma pequena dissipação de pressão-neutra e, portanto, constância da capacidade de carga do tirante ao longo do ensaio (ver itens V.3.4, V.3.6.2 e V.3.6.3).

Com a constância da capacidade de carga, ter-se-ia, segundo as considerações apresentadas no item V.3.6.3, um comportamento linear da relação tensão-velocidade de deslocamento em escala log-normal.

Entretanto, observando-se a curva citada, Figura

V.81, nota-se um decrêscimo do coeficiente angular, com o a crêscimo de tensão. Esta não linearidade da curva é bem sentida a partir do terceiro estágio, e pouco salientada pa ra o trecho anterior.

A constatação acima reforça a hipótese do blo queio ao movimento, se tornar efetivo a partir do terceiro estágio (ver item V.4.4.2).

O coeficiente angular da secante à curva passan do pelos pontos relativos aos 1º e 2º estágios, tem o valor de  $4,03 \log (\text{cm/min})/\text{Kgf/cm}^2$ .

Acredita-se que o coeficiente angular desta reta secante representa o parâmetro  $\alpha'$  deste material nas condi ções de índice de vazios e umidade pré-existentes ao ensaio, visto que em conformidade com as considerações apresentadas anteriormente, espera-se ter sido mínima a drenagem e peque na ou nenhuma a influência do bloqueio nestes estágios inici ais, como fica salientado na concavidade da curva tensão-ve locidade de deslocamento neste trecho.

De acordo com a constatação de Mitchell da cons tância do produto  $(\alpha D_{\max})$ , para um dado solo, a diversos ín dices de vazios,

$$\alpha'_A(D_{\max})_A = \alpha'_B(D_{\max})_B \quad (V.7)$$

sendo:

$\alpha'_A$  e  $(D_{\max})_A$  - parâmetro  $\alpha'$  e tensão-desvio máxima para um dado índice de vazios ( $e_A$ ).

$\alpha'_A$  e  $(D_{\max})_A$  - parâmetro  $\alpha'$  e tensão-desvio máxima para um dado índice de vazios ( $e_B$ ).

Tem-se que, para o comportamento de ruptura de tirantes ancorados em um mesmo solo, a diferentes índices de vazios ( $e_A$ ) e ( $e_B$ ), é válida a expressão:

$$\alpha'_A / \alpha'_B = (D_{\max})_B / (D_{\max})_A = R_B / R_A \quad (V.8)$$

$R_A$  - capacidade de carga no ensaio de primeiro carregamento, para o caso do tirante ancorado num solo com índice de vazio  $e_A$ .

$R_B$  - capacidade de carga no ensaio de primeiro carregamento, para o caso do tirante ancorado num solo com índice de vazios  $e_B$ .

Utilizando-se os valores do ensaio de primeiro carregamento do tirante S-1 tipo I  $\alpha' = 2,48$ ;  $R = 2184$  Kgf e conhecido o valor do parâmetro  $\alpha$  para o ensaio no tirante S-3 tipo I, de acordo com a hipótese apresentada, ter-se-ia para a capacidade de carga desse tirante, segundo a expressão (V.8), o valor 1344 Kgf. Esta carga é relativa a um tempo de ruptura de 67 minutos, visto que a este intervalo está relacionado o valor 2184 Kgf do ensaio do tirante tipo I.

Comparando-se o valor estabelecido por esta expressão (V.8) para a carga de primeira ruptura do ensaio do tirante S-3 tipo I, 1344 Kgf, com o resultado experimental do tirante S-5 tipo I, 1334 Kgf, verifica-se um acrêscimo 0,8%.

O parâmetro  $\alpha'$ , conforme apresentado anteriormente, representativo do comportamento tensão-velocidade de deslocamento do tirante S-3 tipo I, é relativo ao índice de vazios prê-existentes ao ensaio. Assim, o valor da capacidade de carga calculada, adotando-se este parâmetro também o será.

Com maior razão, em virtude do ainda menor tempo de ensaio (portanto, menor possibilidade de drenagem), são também representativos das condições prê-existentes, os dados obtidos nos ensaios do tirante S-5 tipo I.

Em vista do apresentado acima, o valor estabelecido pela expressão (V.8), para o tirante S-3 tipo I teoricamente deveria ser pouco inferior ao determinado em ensaio para o tirante S-5 tipo I, visto que embora ambos sejam relativos às condições do solo prê-existentes ao ensaio (índice de vazios, umidade), os correspondentes tempos de ruptura são diversos. Enquanto para o tirante S-5 tipo I o tempo de ruptura foi de 3 minutos, a do tirante S-3 tipo I foi de 67 minutos. Entretanto, o acrêscimo verificado, 0,8%, é razoável, em vista da impossibilidade de uma precisa definição do

parâmetro  $\alpha'$  do ensaio do tirante S-3 tipo I.

Comparando-se as curvas tempo-velocidade de de formação em escala log x log, dos ensaios de primeiro carre gamento dos tirantes S-1 tipo I, Figura V.23, e S-3 tipo I, Figura V.79, verifica-se uma identidade de comportamento no primeiro estágio, cujos carregamentos foram praticamente i guais: 343,75 Kgf e 338,75 Kgf.

A constatação acima permite confirmar a semelhan ça de formas e condições iniciais de ambos os tirantes.

Os segundo e terceiro estágios do tirante S-3 ti po I, se bem que um pouco influenciados pelo bloqueio, per mite prever o provável comportamento do tirante S-1 caso os estágios de carregamento fossem realizados em um período de tempo suficientemente curto para evitar a drenagem.

## V.5 ENSAIO COM O TIRANTE S-4 TIPO II

### V.5.1 INTRODUÇÃO

Trata-se de um tirante tipo II, com maior defor mabilidade do bulbo relativamente aos tirantes tipo I (ver seção III.3). Acredita-se, em vista dessa deformabilidade, que durante o carregamento as tensões desenvolvidas ao longo do fuste do mesmo, tenham apresentado uma distribuição desu



niforme, mais de acordo com o comportamento dos tirantes em pregados na prática.

O tempo de duração de cada estágio do ensaio foi igual ao adotado para o tirante S-3 tipo I, pois baseando-se na experiência acumulada nos ensaios anteriores, esperava-se dessa forma conseguir-se um mínimo de dissipação de pressão-neutra num período suficiente para bem caracterizar o com portamento tempo-deslocamento-tensão.

A um primeiro ensaio realizado em estágios de car regamento constante até a ruptura, sucederam-se outros de re carregamento, procedendo-se o descarregamento do tirante ao final de cada ensaio.

#### V.5.2 ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO

Os ensaios neste tirante foram iniciados 260 di as após sua execução.

O carregamento foi executado em estágios de car ga constante, aplicados a cada dia.

A carga efetivamente aplicada ao início de cada estágio, de acordo com as primeiras medições efetuadas, fo ram de, respectivamente, 294 Kgf, 696 Kgf e 1061 Kgf (80% da carga de primeira ruptura do tirante S-5 tipo I), ocorrendo,

neste último, ruptura imediata e brusca. Neste tirante o peso próprio tem o valor de 41 Kgf.

Devido ao fato de a carga aplicada no início de cada estágio não se manter rigorosamente constante, o montante de carregamento ao final de cada estágio foi de 309 Kgf, 725 Kgf e 1061 Kgf. Respectivamente, o valor das variações de carregamento dentro de cada estágio foram de 23 Kgf e 29 Kgf, sendo que no último, devido à ruptura imediata, não foi constada variação. Tais variações representam um percentual de 8% e 7% em relação ao acréscimo de carregamento no início do estágio correspondente.

Apresenta-se na Figura V.82 a curva tensão-deslocamento desse ensaio.

Para cada estágio, numerado pela ordem de início de I a III, plotou-se a curva tempo-deslocamento, juntamente com a curva recalque do nível de referência-tempo e carga-tempo em escala log-normal, Figuras V.83a à V.84b.

Na Figura V.85, reúnem-se estágios deste ensaio em curvas tempo-deslocamento-tensão, traçadas utilizando o princípio da superposição de efeitos, englobando as deformações do aço.

Semelhantemente aos tirantes tipo I, as curvas tensão-tempo-deslocamento do ensaio de primeiro carregamento,

foram prolongadas, como se mostra no gráfico, fornecendo a origem "verdadeira" dos deslocamentos. Entretanto, conforme se discute no item V.5.4, o carregamento não foi transmitido ao tirante de forma imediata, falseando as curvas tensão-tempo-deslocamento e, possivelmente, também falseando a determinação dessa origem.

### V.5.3 ENSAIOS DE RECARREGAMENTO

Atingida a ruptura o tirante foi descarregado, e imediatamente submetido a carregamento em estágios de carga.

A carga atuante nos dois estágios do ensaio foi de, respectivamente, 284 Kgf e 540 Kgf (40% da carga de primeira ruptura do tirante S-5 tipo I), atingindo-se a ruptura brusca imediatamente após ao incremento de carga que deu início ao 2º estágio. O período de duração do primeiro estágio foi de 6 minutos.

Este ensaio recebeu a denominação de ensaio de recarregamento "A", representado por A-1 e A-2, respectivamente, os 1º e 2º estágios.

Aliviando-se a carga no tirante, para o valor de menos 13 Kgf (o valor negativo é oriundo do peso próprio, 41 Kgf), no dia seguinte novo ensaio teve começo. O início se deu com um carregamento de 291 Kgf, sendo interrompido 45 mi

nutos ap $\bar{o}$ s, n $\bar{a}$ o sendo constatada varia $\bar{c}$ oes no valor do carregamento ao longo do per $\bar{i}$ odo.

Ap $\bar{o}$ s este ensaio, o tirante foi novamente descarregado para 3 Kgf, iniciando-se outro no dia seguinte.

O tempo de dura $\bar{c}$ ao deste novo ensaio foi tamb $\bar{e}$ m 45 minutos, tendo-se iniciado com um carregamento de 441 Kgf, o qual ao t $\bar{e}$ rmino do ensaio apresentava-se igual a 429 Kgf.

Seguindo-se a estes dois ensaios iniciou-se um terceiro, no dia seguinte ao t $\bar{e}$ rmino do anterior. A carga pr $\bar{e}$ -existente de menos 6 Kgf, resultante do descarregamento ao t $\bar{e}$ rmino do ensaio passado, acresceu-se o carregamento para o total de 548 Kgf (43% da carga de ruptura de primeiro carregamento do tirante S-5 tipo I). A ruptura brusca foi atingida num per $\bar{i}$ odo inferior a 18 segundos do in $\bar{i}$ cio do ensaio.

Um quarto e quinto ensaios seguiram-se ent $\bar{a}$ o, realizados cada um com um dia de defasagem do anterior. A carga pr $\bar{e}$ -existente destes ensaios foi de, respectivamente, 4 Kgf e 3 Kgf. Os valores dos carregamentos ao in $\bar{i}$ cio desses ensaios foram de 510 Kgf e 501 Kgf (38,2% e 37,5% da carga de ruptura do tirante S-5 tipo I) e os finais, 510 Kgf e 493 Kgf, respectivamente. No quarto ensaio, a ruptura brusca foi atingida a 36 segundos do in $\bar{i}$ cio do ensaio. Enquanto no quinto, mantido pelo per $\bar{i}$ odo de 36 minutos, n $\bar{a}$ o se verificou

ruptura nem deformações excessivas, apresentando um comportamento similar aos ensaios de menor nível de tensões.

A estes cinco ensaios deu-se a denominação "B", representando "B-1", "B-2", "B-3", "B-4" e "B-5", respectivamente, os 1º, 2º, 3º, 4º e 5º ensaios.

Para estes ensaios foram traçadas curvas tempo-deslocamento, juntamente com curvas recalque do nível referência-tempo e carga-tempo em escala log-normal, Figuras V.86 à V.91, e curvas tensão-deslocamento, Figuras V.92 à V.97.

Na Figura V.98 resumem-se estes ensaios em curvas tempo-deslocamento-tensão englobando as deformações do aço.

#### V.5.4 CAPACIDADE DE CARGA

Conforme apresentado no item V.5.2, no terceiro estágio, a um carregamento de 1061 Kgf, poucos segundos após o acréscimo correspondente, ocorreu ruptura brusca num ensaio de primeiro carregamento em estágios de carga com o tirante S-4 tipo II. A tensão média de ruptura, ao longo do fuste, para a área lateral de 5755 cm<sup>2</sup>, teve o valor de 0,18 Kgf/cm<sup>2</sup>.

A ruptura ocorreu praticamente de forma imediata, fazendo crer que o acréscimo do terceiro estágio foi superior ao necessário para que ela se processasse.

Comparando-se com o valor da carga de ruptura de primeiro carregamento do tirante S-5 tipo I, item V.2.2, de dimensões e forma de execução idênticas, a menos da seção de aço do bulbo (ver item III.3), de 1334 Kgf, constata-se, um decréscimo de 273 Kgf, representando 20% da carga do ensaio do tirante tipo I.

Logo após o término do primeiro ensaio de carregamento, o tirante foi levado novamente à ruptura num ensaio de recarregamento, no qual, imediatamente ao acréscimo de carga do 2º estágio, deu-se a ruptura brusca do tirante a um valor de carregamento de 540 Kgf. Também para este caso a creditou-se ser o carregamento superior ao necessário a esta processar-se. A tensão média de ruptura ao longo do fuste neste ensaio foi de 0,095 Kgf/cm<sup>2</sup>.

Novos ensaios seguiram-se a este primeiro ensaio de recarregamento. Três dias após, no quarto ensaio desta série, a um carregamento de 548 Kgf a ruptura brusca processou-se, num período inferior a 18 segundos do início.

No dia seguinte ao término desse último ensaio, foi iniciado um quinto ensaio, atingindo-se a ruptura brusca ao carregamento de 510 Kgf, num período inferior a 30 segun

dos. A tensão média de ruptura foi de 0,09 Kgf/cm<sup>2</sup>.

No sexto ensaio da série, com um dia de defasagem do quinto, sob um carregamento de 501 Kgf, a ruptura não foi atingida no período de 36 minutos de ensaio.

Como visto acima a ruptura deu-se a diferentes carregamentos, variando o tempo de ruptura de acordo com a regra: maior o carregamento, menor o tempo necessário para atingi-la. Este fato é uma característica dos solos em geral, já comendata no item V.3.4.

A discrepância ocorrida entre o primeiro e segundo ensaios levados à ruptura (se bem que a diferença entre os dois carregamentos é pouco significativa (7,5 Kgf; 1,2%)), em que a regra exposta acima foi aparentemente violada, teve possivelmente origem num ganho de resistência após a primeira ruptura, devido à dissipação parcial da poro-pressão (ver item V.3.4).

Comparando-se o valor da carga de ruptura do ensaio de recarregamento do tirante S-5 tipo I, 925 Kgf, com os valores do tirante S-4 tipo II verifica-se em relação ao primeiro ensaio de recarregamento de valor 540 Kgf, um decréscimo de 385 Kgf (42% da carga de ruptura de recarregamento do tirante S-5 tipo I). Com relação ao quinto ensaio, 510 Kgf, verifica-se um decréscimo de 415 Kgf (45% da carga de ruptura de recarregamento do tirante S-5 tipo I).

As diferenças assinaladas para as cargas de ruptura dos ensaios de primeiro carregamento e do primeiro ensaio de recarregamento, entre os dois tirantes S-4 tipo II e S-5 tipo I, respectivamente, 20% e 42%, certamente seriam maiores caso o tempo de ruptura para os dois ensaios tivessem sido iguais pois, enquanto para o tirante S-5 tipo I a ruptura deu-se, respectivamente, em três e dois minutos, para os ensaios de primeiro carregamento e recarregamento no tirante S-4 tipo II deu-se praticamente de forma imediata (ver item V.3.4). Para a carga de ruptura de recarregamento provavelmente essa diferença não seria em muito acrescida, visto que no quinto ensaio de recarregamento do tirante S-4 tipo II no qual se atingiu a ruptura em 36 segundos, o valor do carregamento foi pouco superior ao sexto, no qual a ruptura não foi atingida em 36 minutos de ensaio. A diferença percentual entre as cargas de ruptura de recarregamento dos dois tirantes, S-4 tipo II e S-5 tipo I, passa a 45% adotando-se a carga deste quinto ensaio como referência.

O tirante S-4 tipo II, está alinhado entre os tirantes S-3 e S-5 tipo I a 3 metros de distância de ambos, Figuras III.32 e III.33. O modo de execução foi idêntico, e o material na região é bem homogêneo, conforme ficou salientado nos ensaios realizados por Vilela<sup>9</sup> e demais sondagens da área. A única diferença estrutural desse tirante é ser do tipo II enquanto os demais são do tipo I. Isto significa ter uma menor área de seção de aço relativamente aos demais (tipo II = 0,5 cm<sup>2</sup>; tipo I = 4 cm<sup>2</sup>), permitindo portanto,



uma maior deformação do bulbo com o acréscimo do carregamento (ver seção III.3).

Os resultados para capacidade de carga desse tirante S-4 tipo II, em vista do exposto acima, parecem confirmar as hipóteses a serem apresentadas na seção VI. A menor seção de aço, concorreu para a maior deformabilidade do bulbo, ocasionando distribuição irregular de tensões ao longo do fuste, que em simultaneidade com o comportamento tensão-deformação do solo, levou a uma capacidade de carga menor neste tirante.

Uma segunda hipótese, que explique esta diferença entre a capacidade dos dois tirantes baseando-se na possibilidade da ruptura da aderência entre o concreto e o cabo de tração não é provável, pois a tensão média solicitante nesse contato no momento da carga de primeira ruptura foi de 2,7 Kgf/cm<sup>2</sup>, enquanto a estimativa da tensão média de aderência segundo a norma brasileira EB-3, para barras lisas é de 20 Kgf/cm<sup>2</sup>, segundo a expressão abaixo.

$$a = \frac{3}{4} \times n \times \sigma_{Tm} \quad (V.9)$$

a = aderência.

n = coeficiente de aderência (igual a 1,0 para barras lisas).

$\sigma_{Tm}$  = resistência a tração da argamassa.

A resistência a tração da argamassa foi estimada pelas expressões:

$$\sigma_{Rm} = K_{28} (1/x - 0,5) \quad (V.10)$$

e,

$$\sigma_{Tm} = \sigma_{Rm} / 10 \quad (V.11)$$

$\sigma_{Rm}$  = resistência a compressão da argamassa.

$x$  = fator água-cimento (igual a 0,5).

$K_{28}$  = parâmetro de resistência à 28 dias da pega (igual a 180 Kgf/cm<sup>2</sup>).

A primeira expressão é a fórmula de Bolomey, para concretos, utilizado o coeficiente obtido no laboratório da Escola Nacional de Engenharia  $K_{28}$  igual a 180 Kgf/cm<sup>2</sup>. A segunda expressão, também empírica, relaciona a resistência à compressão do concreto com a resistência à tração simples.

#### V.5.5 SENSIBILIDADE

Conforme definida no item V.2.3, a sensibilidade é expressa por:

$$S = R_I / R_{II}$$

$R_I$  - resistência a "primeira" ruptura, conforme definida no item V.2.2.

$R_{II}$  - resistência ao recarregamento.

Para o caso do tirante em pauta, ensaiado da forma descrita, a sensibilidade teve o valor de 2,0.

Conforme explanado no item V.3.5, o valor da sensibilidade corretamente definido como representativo do amolgamento do material de fundação, deve levar em consideração a velocidade de ruptura.

Nos ensaios de primeira ruptura e de recarregamento, a ruptura ocorreu praticamente de forma imediata ao acrêscimo de carga. Não podendo portanto, ter-se neste caso uma idéia precisa da relação entre os tempos de ruptura, é mais válido se considerar o valor 2,0 apenas como uma estimativa desse parâmetro.

Este valor se situa dentro da faixa de sensibilidade obtida em ensaios de laboratório com amostras indeformadas, realizados por Vilela<sup>9</sup>, entre 1,7 e 3,3, e acima da obtida no ensaio do tirante S-5 tipo I, 1,44, e da faixa (1,06 a 1,33) do ensaio do tirante S-1 tipo I.

Conforme apresentado anteriormente, a sensibilidade é um índice representativo do grau de amolgamento provo

cado pela ruptura no ensaio de primeiro carregamento.

No item V.3.5, são feitas considerações, pelas quais, devido ao amolgamento provocado pelas deformações lentas durante o ensaio de fluência, este índice seria menor quanto maior fosse o tempo de duração do ensaio de primeiro carregamento.

Tendo em vista as considerações acima, era esperado que o valor da sensibilidade (2,0) obtido nesse ensaio com dois dias de duração, fosse superior à faixa do ensaio do tirante S-1 tipo I, 1,06 a 1,33, com 92 dias de duração. Como também se esperava que este valor fosse inferior à faixa de sensibilidade obtida nos ensaios de laboratório, devido principalmente ao maior amolgamento relativamente as amostras "indeformadas" de laboratório, que se supõe ter ocorrido no material adjacente ao bulbo na fase executiva do tirante (ver seção V.2.3).

Da mesma forma, de acordo com as considerações apresentadas anteriormente, devido ao maior tempo de ensaio do tirante S-4 tipo II, o valor da sensibilidade desse ensaio (2,0) deveria ser inferior à do tirante S-5 tipo I (1,44). Entretanto, isto não se deu por terem sido estes índices estabelecidos através de valores de carregamento correspondentes aos ensaios de "primeiro" carregamento e recarregamento nos quais a ruptura foi atingida a intervalos de tempo diferentes, prejudicando dessa forma, em maior ou menor grau, sua

representatividade (ver item V.3.5), principalmente para o caso do tirante S-4 tipo II, no qual se acredita que o valor da carga de ruptura do ensaio de primeiro carregamento foi superior ao necessário para esta se processar.

#### V.5.6 COMPORTAMENTO TEMPO-TENSÃO-DESLOCAMENTO

Na Figura V.85 encontram-se as curvas tensão-tempo-deslocamento, traçadas utilizando os princípios da superposição de efeitos, reunindo os estágios do ensaio de primeiro carregamento, englobando as deformações do aço.

Da mesma forma, na Figura V.98 são apresentados num gráfico tensão-tempo-deslocamento, os ensaios de recarregamento.

Juntamente com as curvas de carregamento citadas acima, apresenta-se uma reta tracejada com inclinação da curva de descarregamento do "ensaio A". Na Figura V.99, são apresentados os diversos ensaios de descarregamento realizados neste tirante.

Estes tirantes, semelhantemente aos tirantes tipo I (ver seção III.4), possuem o trecho livre com dimensões geometricamente bem definidas (13,2 metros) e, de acordo com a execução e verificação posterior, livre de influências de atrito ao longo do seu comprimento. Conhecido o módulo de

elasticidade do aço ( $E = 2,1 \times 10^6 \text{ Kgf/cm}^2$ ) e a área da seção dos cabos ( $0,5 \text{ cm}^2$ ,  $1 \phi 8 \text{ mm}$ ), determinou-se a reta de descarregamento teórica representativa da parcela do aço, a qual consta em linha cheia da Figura V.99 juntamente com as demais curvas experimentais.

A comparação das curvas teóricas e experimentais conduz à conclusão de ter sido relativamente pequena no comportamento de descarga, a influência de fatores outros que não a redução de tensões no aço. Esta constatação experimental apresenta-se dentro do esperado em virtude da maior deformabilidade desse tirante, originária da menor seção de aço (tirante tipo I -  $4 \text{ cm}^2$ , tirante tipo II -  $0,5 \text{ cm}^2$ ). Neste caso os demais fatores, ao contrário do que foi verificado no tirante tipo I, apresentam uma menor importância.

A curva teórica de descarregamento (em linha cheia) também é apresentada juntamente com a curva experimental do "ensaio A" (em tracejado), com as curvas tempo-tensão-deslocamento.

Analisando estas curvas verifica-se que o carregamento não se dá de forma imediata. Isto se deve à maior deformabilidade dos cabos do trecho livre, nestes tirantes do tipo II, devido à relação entre as seções dos cabos (tipo I =  $4 \text{ cm}^2$ ,  $8 \phi 8 \text{ mm}$  tipo II =  $0,5 \text{ cm}^2$   $1 \phi 8 \text{ mm}$ ) e o comprimento do trecho livre (tipo I =  $12,5 \text{ m}$ , tipo II =  $13,2 \text{ m}$ ). A deformabilidade, 8,5 vezes superior à dos tirantes do tipo I, in

teragindo com o atrito no macaco, fez com que o carregamento desejado não fôsse aplicado integralmente de forma imediata.

Nos tirantes do tipo I, medições realizadas em uma das três "load-cells" do conjunto a partir do momento de acréscimo de carga, verificaram-se variações de 3 a 10 Kgf, o que representa, supondo o mesmo para as demais, um total de 9 a 30 Kgf para o tirante. O período de estabilização foi rápido, pouco variando a partir de seis segundos.

O mesmo procedimento tentou-se adotar para o ti rante tipo II; entretanto, os valores determinados apresen taram-se discordantes, com as curvas tensão-deformação-tempo apresentando um total de variação inferior a que seria de se esperar pela análise destas curvas. Isto se deve possivelme nte à desuniformidade de carregamento em cada "load-cell", principalmente nas leituras iniciais, e ao rápido deslocamento do ponteiro do aparelho de leitura, o que possivelmente não permitiu uma constatação correta da carga. A estabili zação do carregamento se fez em média em torno de dois minuto s após o início do ensaio, pouco variando a partir de 1 minu to.

Nestes tirantes, devido à sua deformabilidade, pequenas variações de carga promovem alongamentos significati vos dos fios relativamente ao deslocamento real do bulbo, assim consequentemente nesta fase inicial devido à variação de carregamento, o deslocamento medido na extremidade superior do trecho livre não mais se relacionou com o movimento do

bulbo.

As primeiras leituras de carregamento foram realizadas em sua maioria a três minutos de ensaio (gráfico carga-tempo, Figuras V.83a a V.84b e Figuras V.86 a V.91)). Descontando-se a deformação do trecho livre correspondente a estes carregamentos, traçaram-se para os diversos ensaios, curvas da parcela de deslocamento do bulbo, apresentadas na Figura V.100, para o ensaio de primeiro carregamento e na Figura V.101 para os de recarregamento. Convém salientar que a partir desses três minutos iniciais a máxima variação de carregamento verificada para os diversos ensaios foi de 7%, situando-se em média em torno de 1 a 2%. Assim, em vista de o tempo de duração de cada ensaio ter-se limitado a dois dias para o ensaio de primeiro carregamento e a 45 minutos para os de recarregamento, perfazendo um período total de ensaio de oito dias, acredita-se ter sido mínima a drenagem da água do material de fundação e, daí, mínima a variação do índice de vazios. Desta forma é válido considerar cada ensaio a partir do momento de integral aplicação do carregamento, como um período de fluência não drenada, relacionados todos e les às mesmas características de índice de vazios e umidade pré-existente ao primeiro ensaio. Estas curvas foram traçadas a partir de três minutos de ensaio sendo apresentado a seguir observações oriundas da sua análise.

Com exceção do primeiro estágio do ensaio de primeiro carregamento, as curvas tempo-deslocamento apresenta



ram-se basicamente similares às correspondentes aos tirantes tipo I, isto é, observou-se para os ensaios de baixos níveis de tensões um decréscimo com o tempo do coeficiente angular da curva em escala log-normal.

A curva correspondente ao primeiro estágio, após apresentar uma fase crescente, modificou-se, passando a de crescer.

Entretanto, o "tempo de estabilização" (tempo no qual a velocidade de deslocamento do tirante é baixa o sufi ciente para considerá-lo erroneamente estabilizado) do tiran te tipo II é superior ao tirante tipo I (ver curvas tempo -deslocamento tirante tipo I, Figuras V.13a a V.18, Figuras V.36a a V.51 e Figuras V.68a a V.74b). Enquanto nos tiran tes do tipo I, o tempo de estabilização situou-se entre 1 e 2 minutos, no tirante S-4 tipo II no ensaio de primeiro car regamento, foi superior a 40 minutos e no ensaio de recarre gamento "B-1", 7 minutos.

Na Figura V.102 encontram-se as curvas experimenta is tensão-tempo-deslocamento traçadas utilizando o princípi o da superposição de efeitos do ensaio do tirante S-4 tipo II e dos três primeiros estágios do ensaio de primeiro carre gamento do tirante S-3 tipo I, descontado o alongamento do aço segundo a curva de descarga teórica. Em tracejado en contram-se também representadas as curvas teóricas tensão -tempo-deslocamento do tirante S-3 tipo I, também utilizando

o princípio da superposição de efeitos, de acordo com as curvas teóricas tempo-deslocamento desse tirante, para os tempos de ensaio de 6, 12 e 30 segundos e 1, 2, 4, 50 e 1440 minutos, sendo estas três últimas coincidentes.

Como fica salientado, apesar do comportamento tempo-deslocamento ser diverso, o comportamento tensão-deslocamento não apresenta sensíveis diferenças, a menos do primeiro estágio. Acredita-se que parte desse maior deslocamento no primeiro estágio tem possivelmente origem nas diferentes parcelas que devem ser creditadas à acomodações do carregamento.

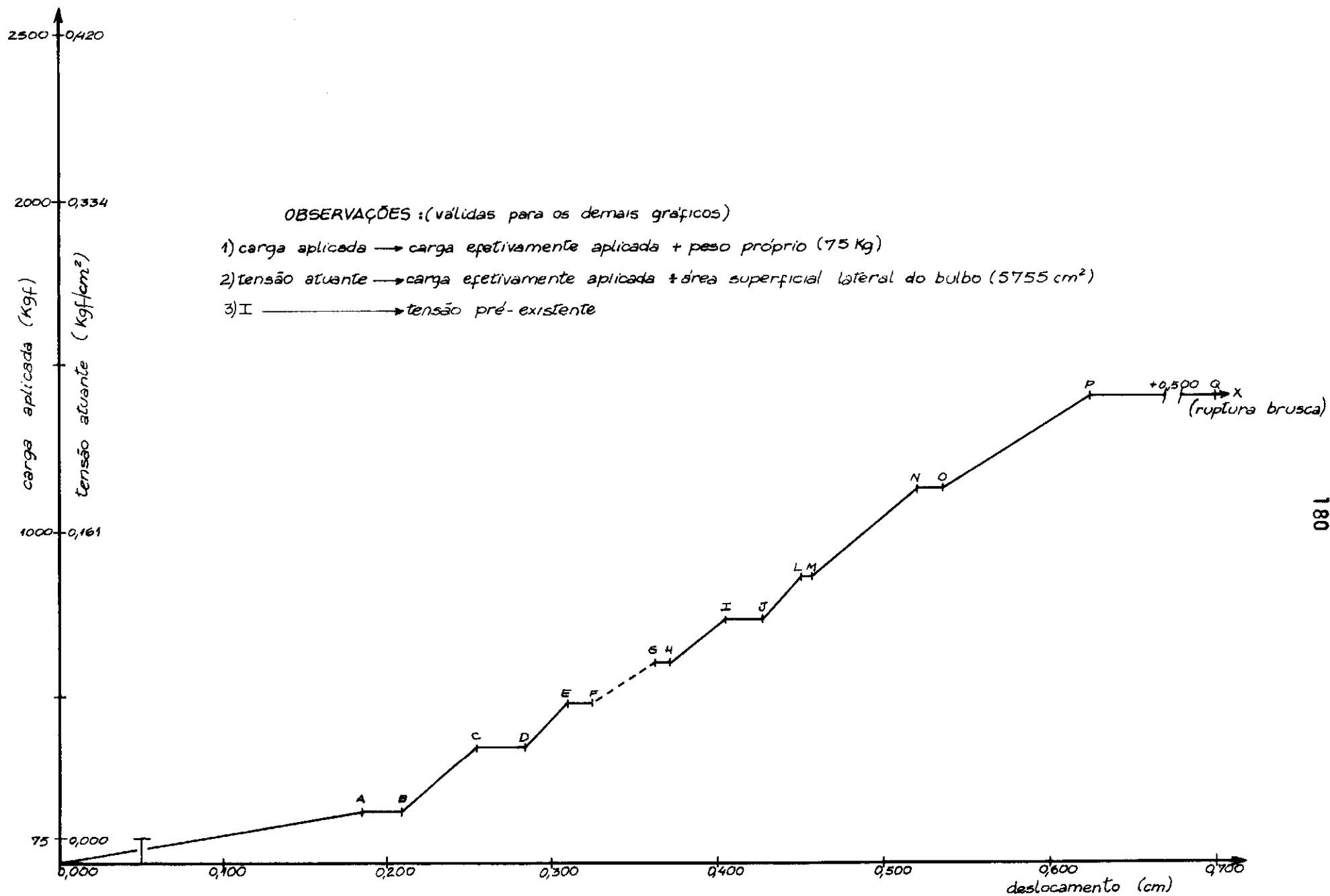


FIG. T.1 TIRANTE S-5 TIPO I (ENSAIO A - PRIMEIRO CARREGAMENTO)

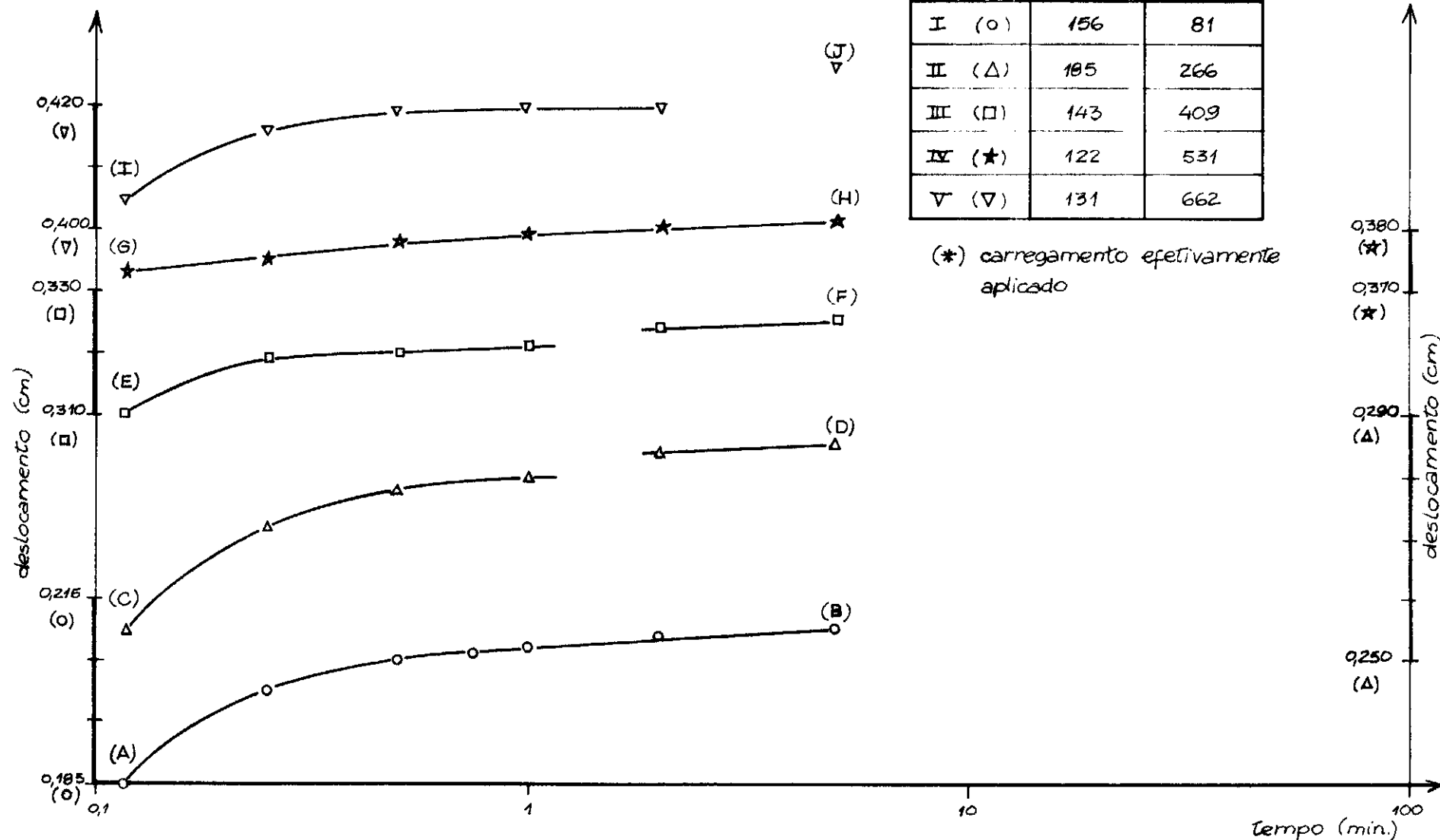


FIG. V.2a TIRANTE S-5 TIPO I (ENSAIO A - PRIMEIRO CARREGAMENTO)

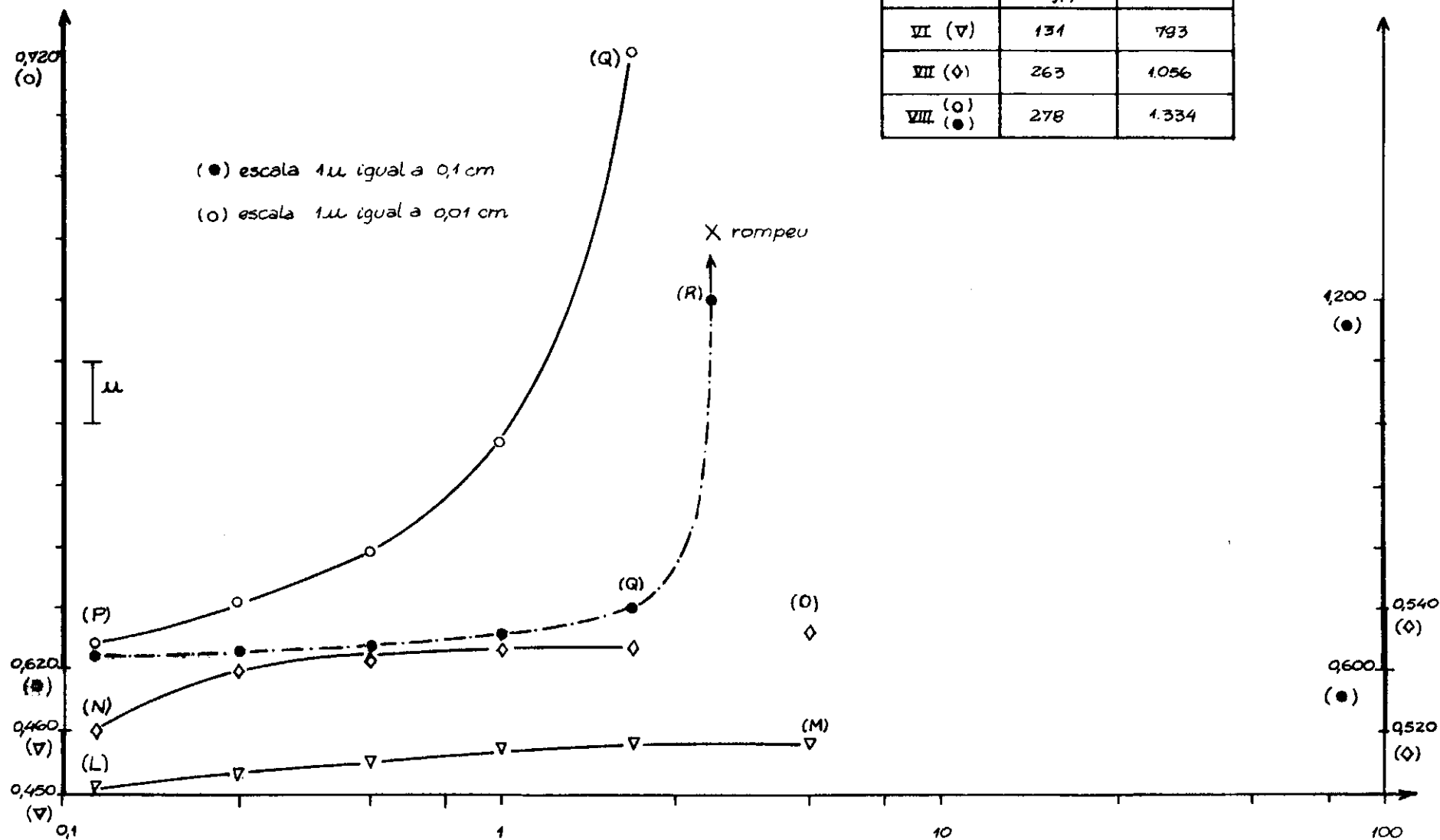


FIG. T.2.b. TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO A - PRIMEIRO CARREGAMENTO).

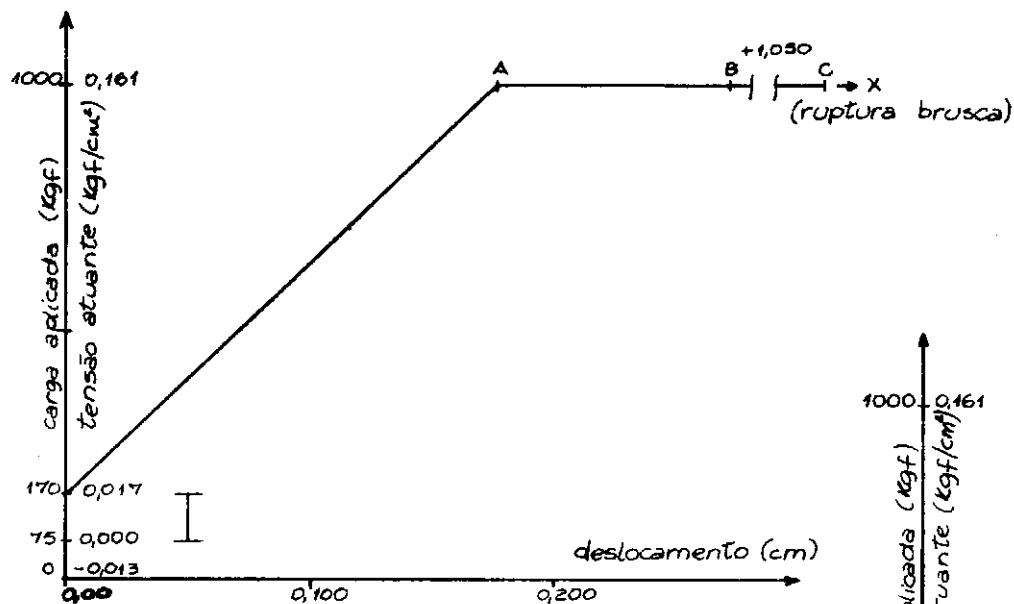


FIG. V.3. TIRANTE S-5 TIPO I  
(ENSAIO B - RECARREGAMENTO)

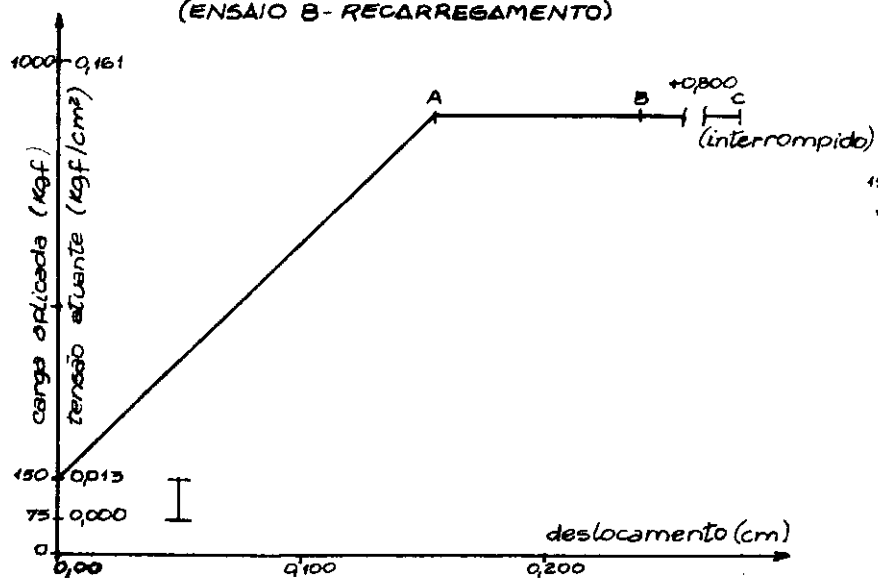


FIG. V.4 TIRANTE S-5 TIPO I  
(ENSAIO C - RECARREGAMENTO)

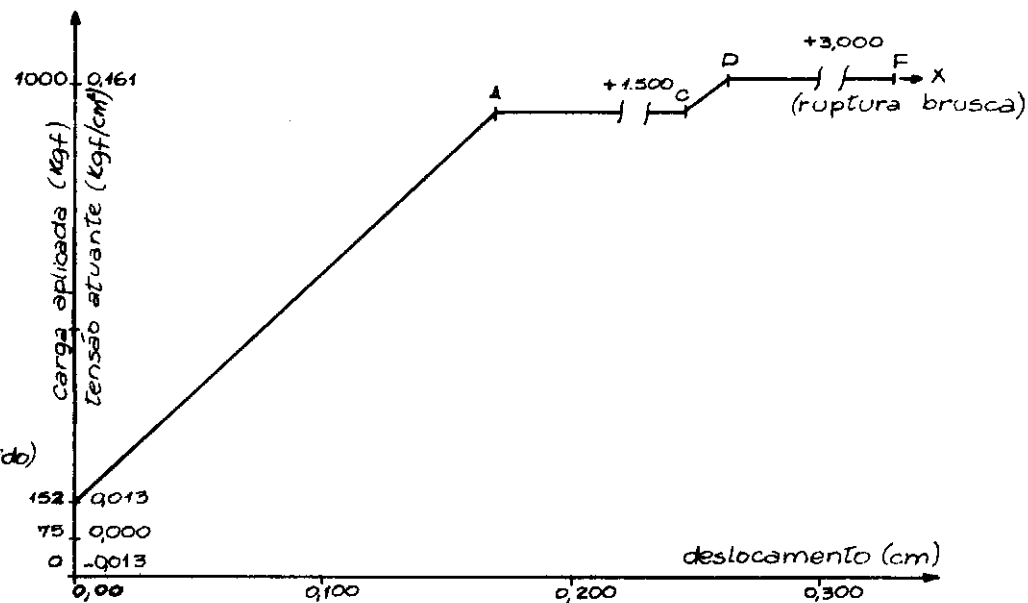


FIG. V.5 TIRANTE S-5 TIPO I  
(ENSAIO D - RECARREGAMENTO)

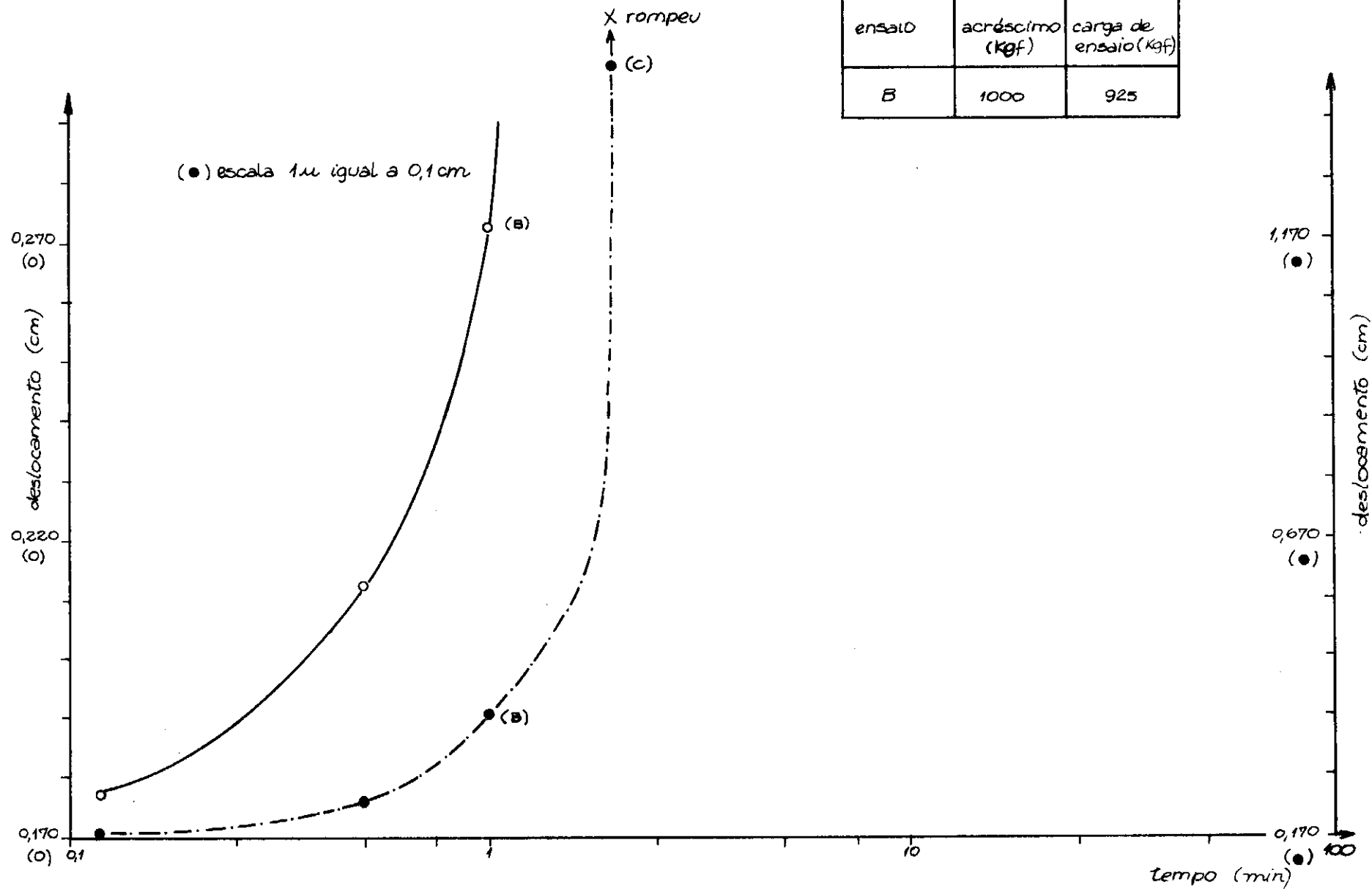


FIG T.6 TIRANTE S-S TIPO I (ENSAIO B- RECARREGAMENTO)

| ensaio | acr scimo<br>(kgf) | carga de<br>ensaio (kgf) |
|--------|--------------------|--------------------------|
| C      | 894                | 819                      |

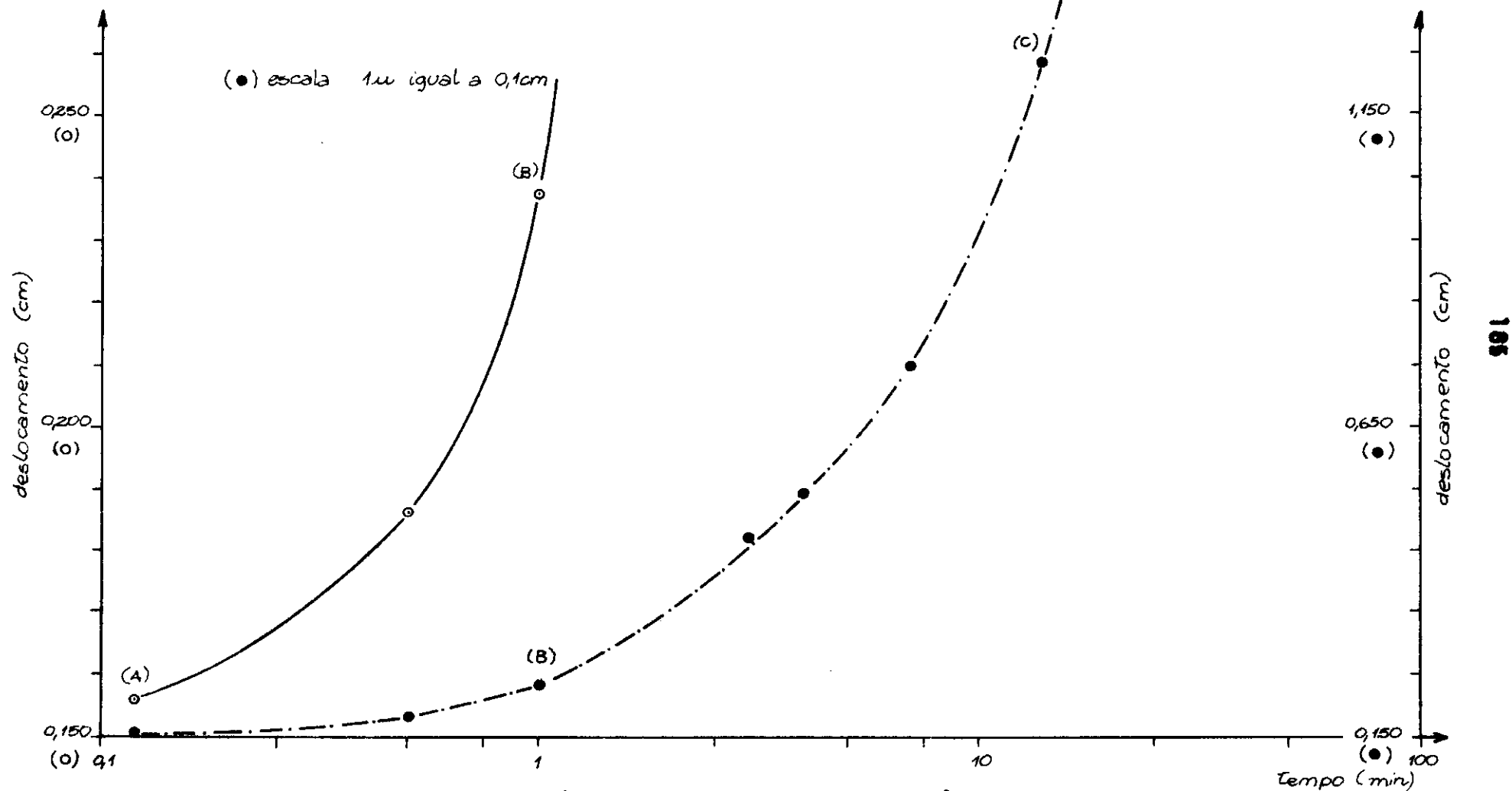


FIG. V.7. TIRANTE 6-5 TIPO I (ENSAIO C - RECARREGAMENTO).





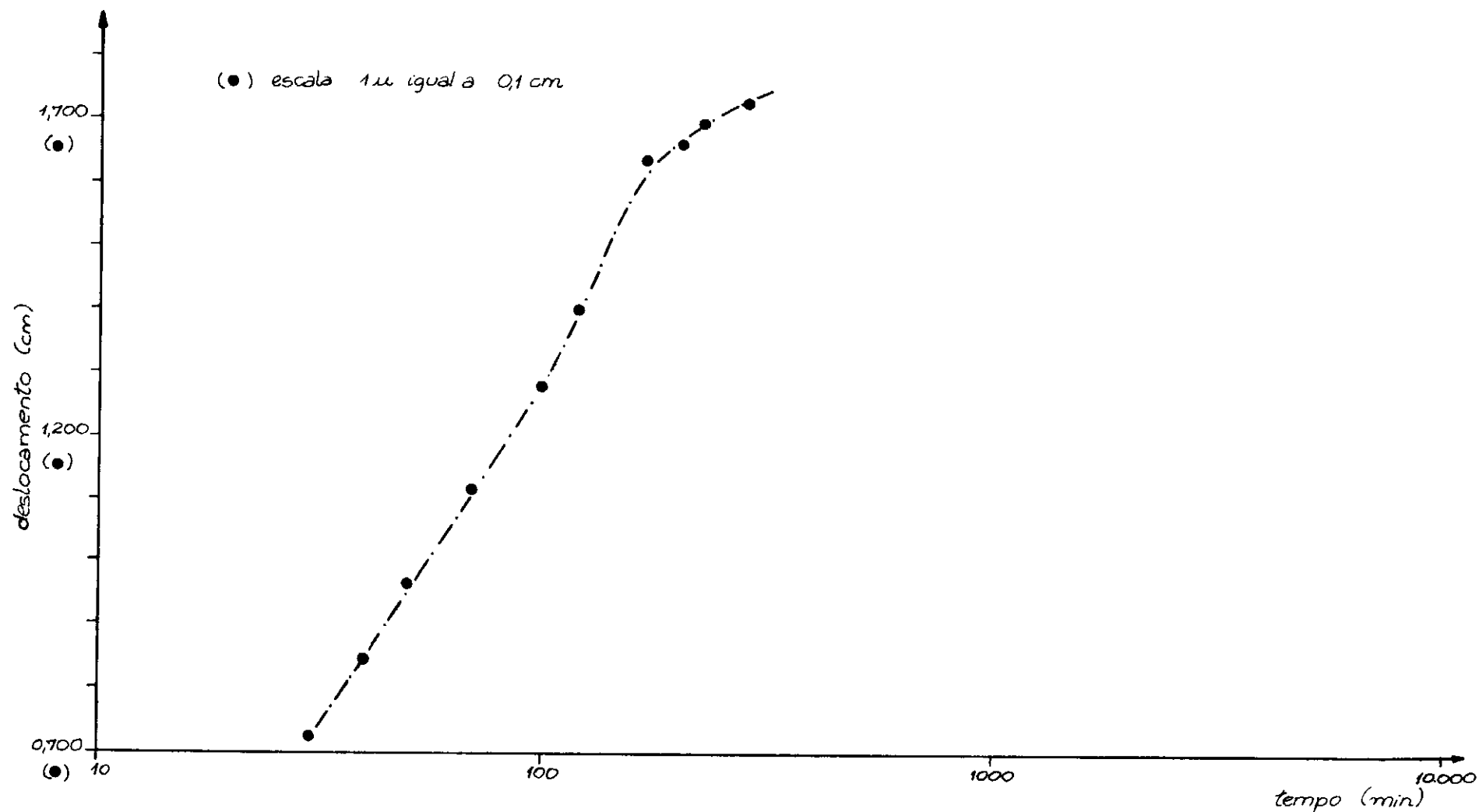


FIG. V.B.b. TIRANTE 5-5 TIPO I (ENSAIO D - RECARREGAMENTO - ESTÁGIO D-1, CONTINUAÇÃO)

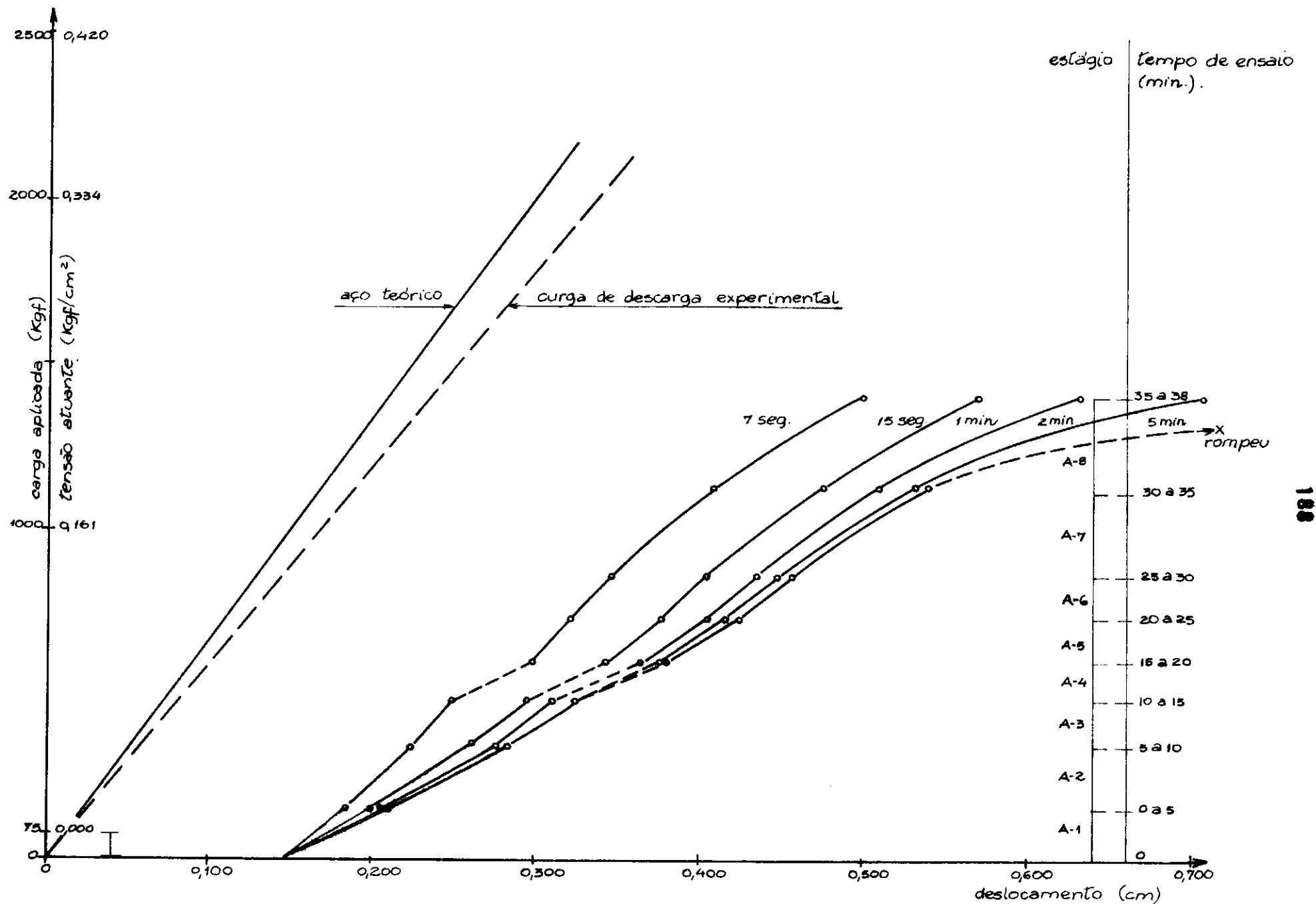


FIG. V.9 TIRANTE S-5 TIPO I (ENSAIO A- PRIMEIRO CARREGAMENTO)

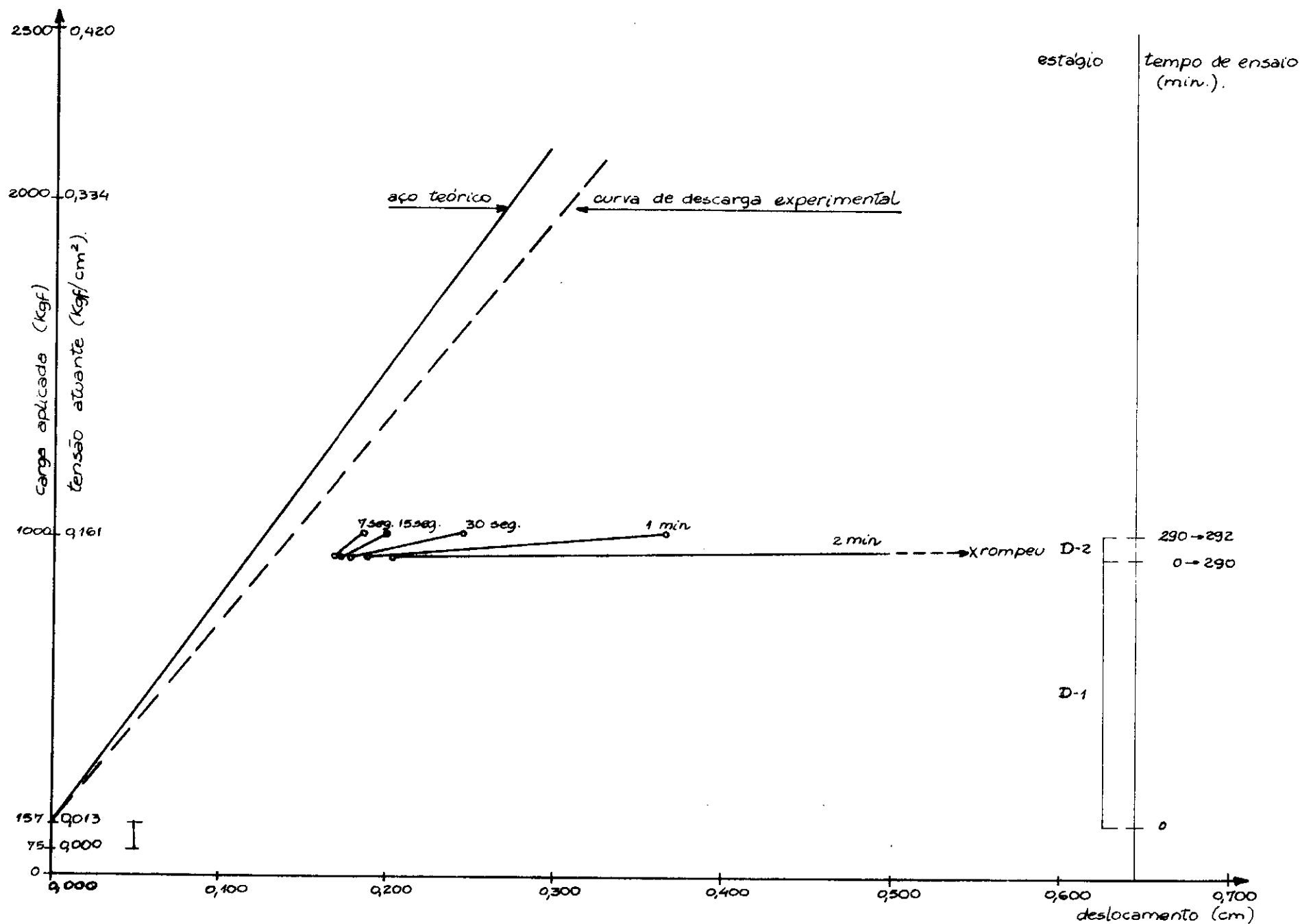


FIG. V. 10. - TIRANTE S-5 TIPO I (ENSAIO D- RECARREGAMENTO)

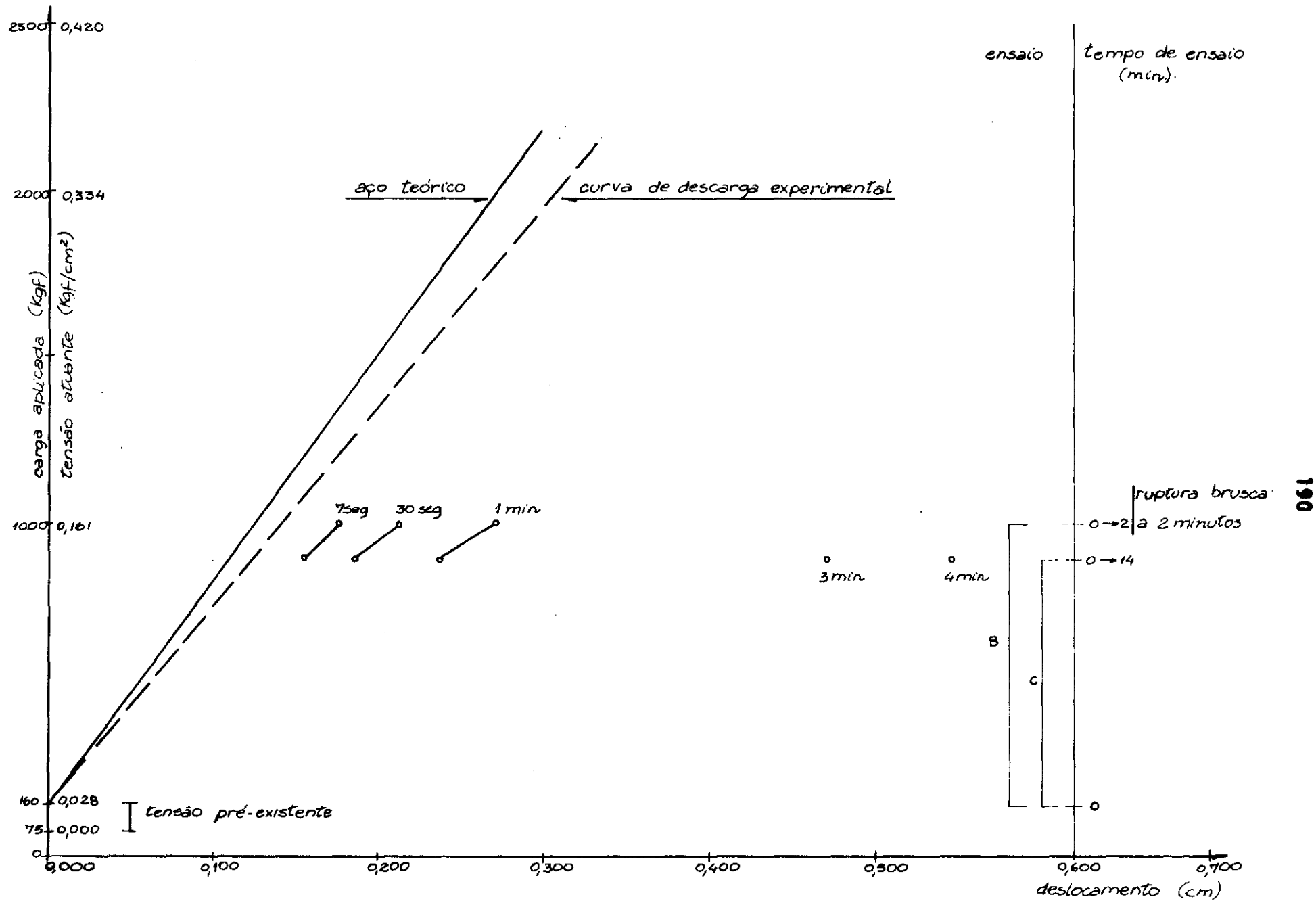


FIG. V.11 TIRANTE S-5 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO)

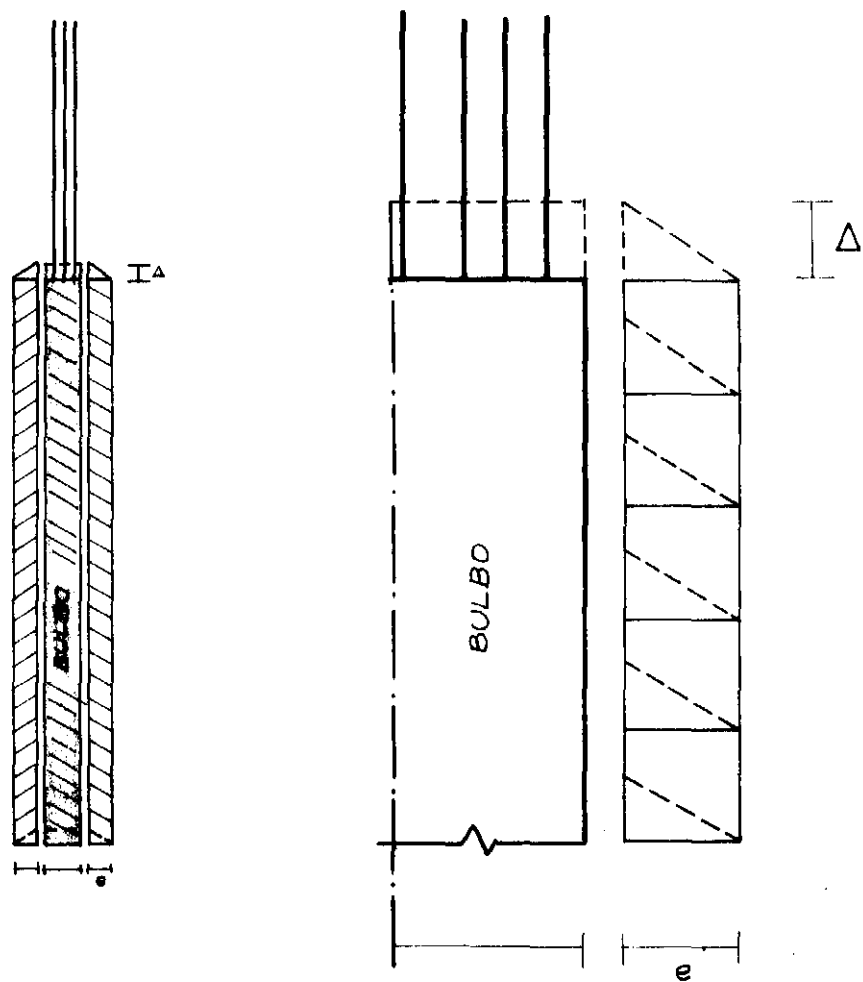


FIG. V.12 ESPESSURA DE RUPTURA

variação de carga (%)

110%  
110%  
90%

0,1

1

10

tempo (min.).

100

| estágio | acréscimo<br>(kgf) | carga de ensaio (kgf) * |                  |       |
|---------|--------------------|-------------------------|------------------|-------|
|         |                    | início                  | % de variação ** | final |
| I       | 344                | 269                     | 13%              | 305   |

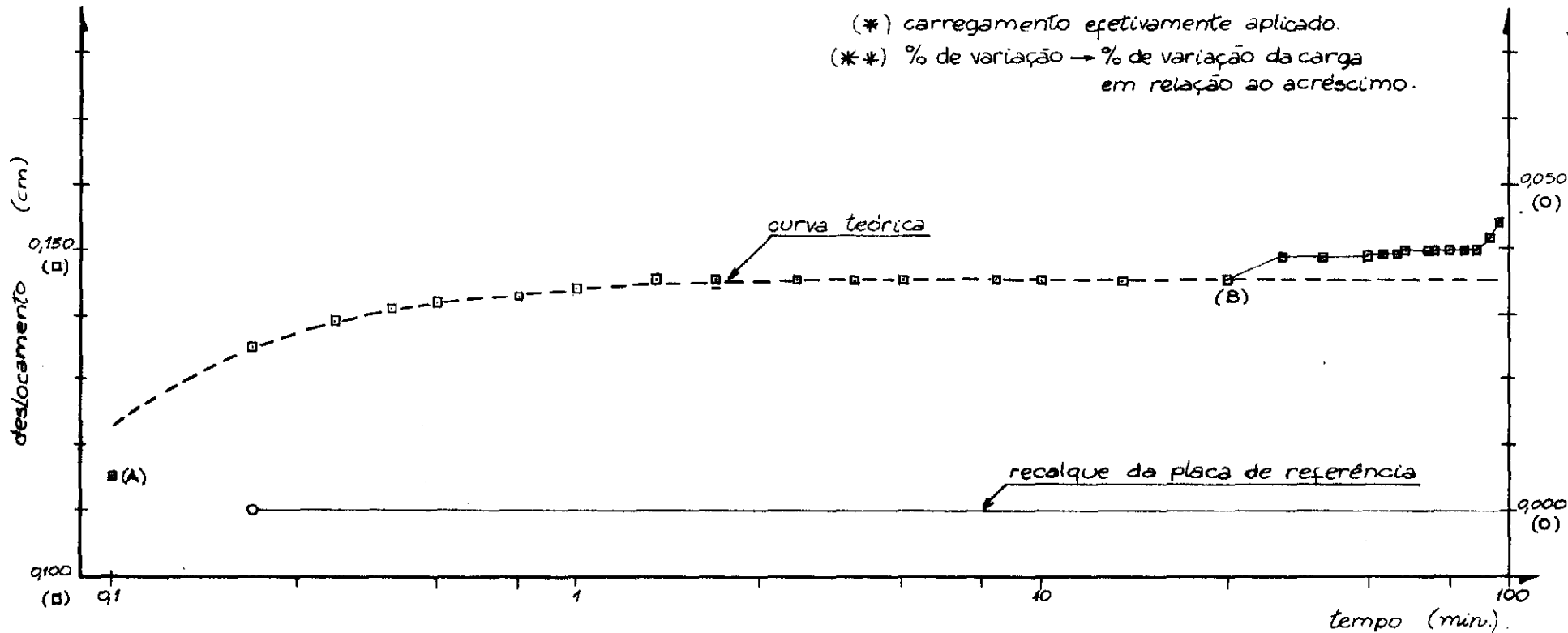


FIG. V.13a TIRANTE 5-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO I).

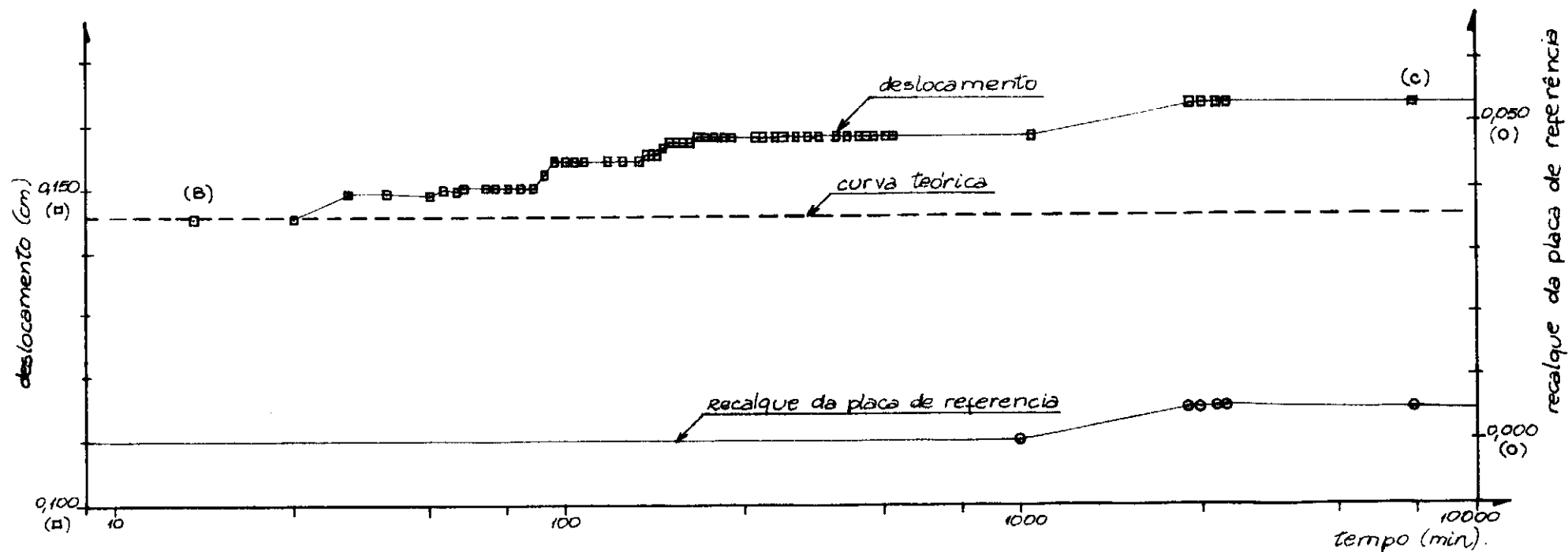
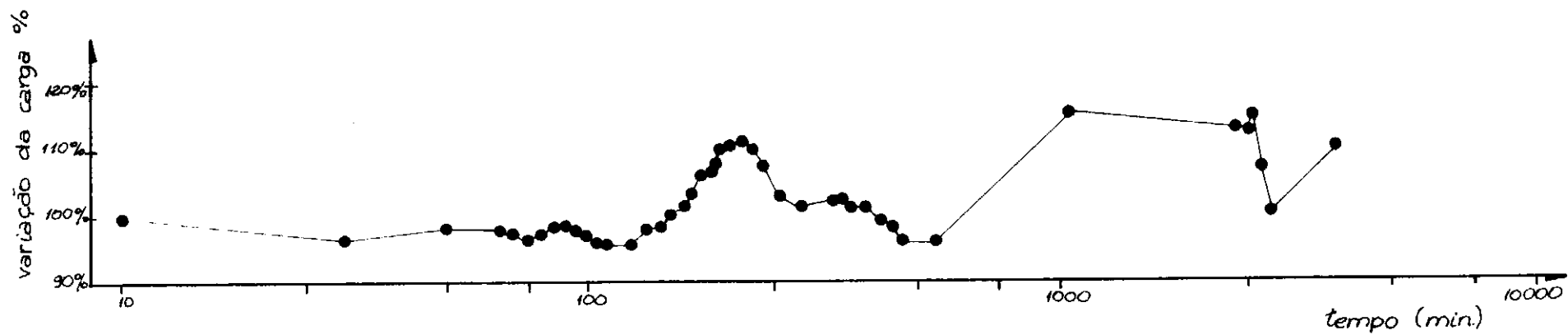


FIG. V.13b TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO I - CONTINUAÇÃO)



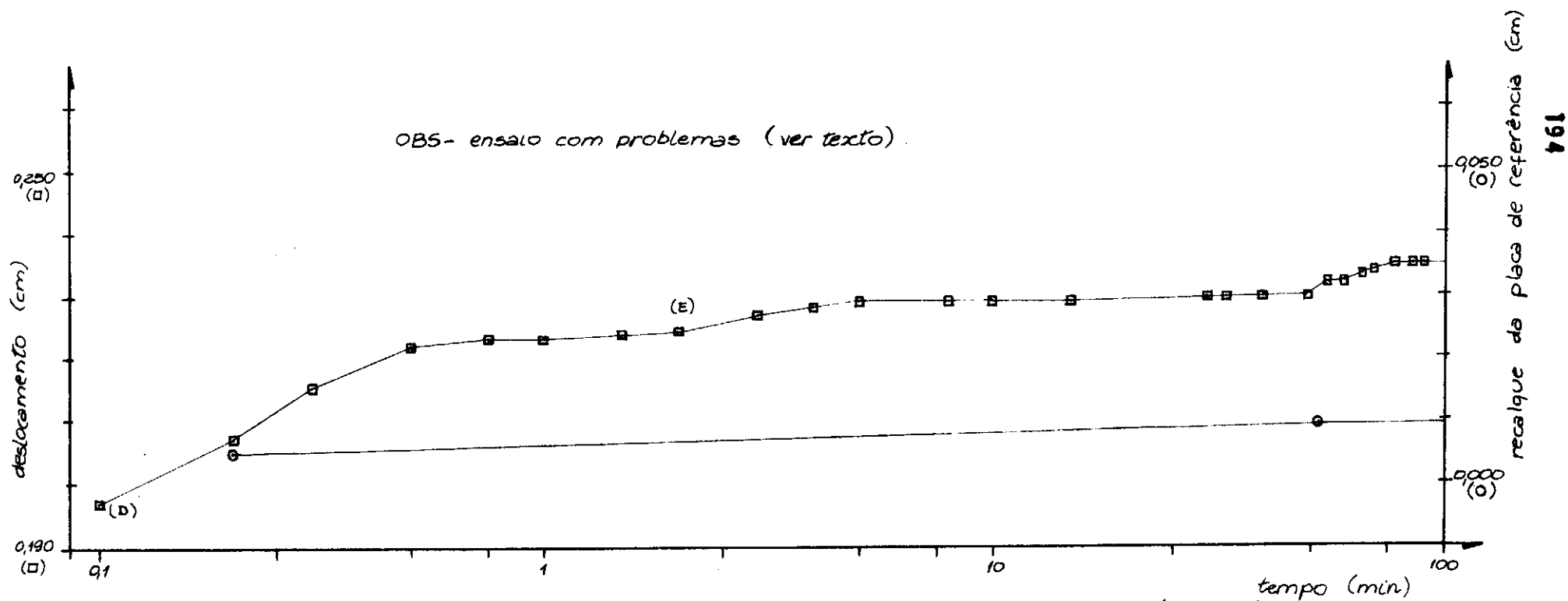
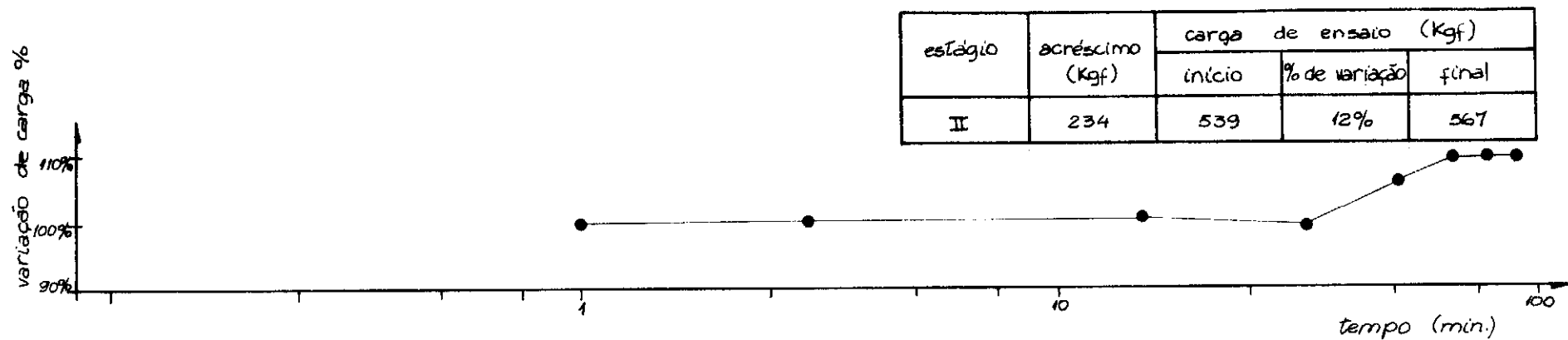


FIG. V. 14a TIRANTE 5-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO II).

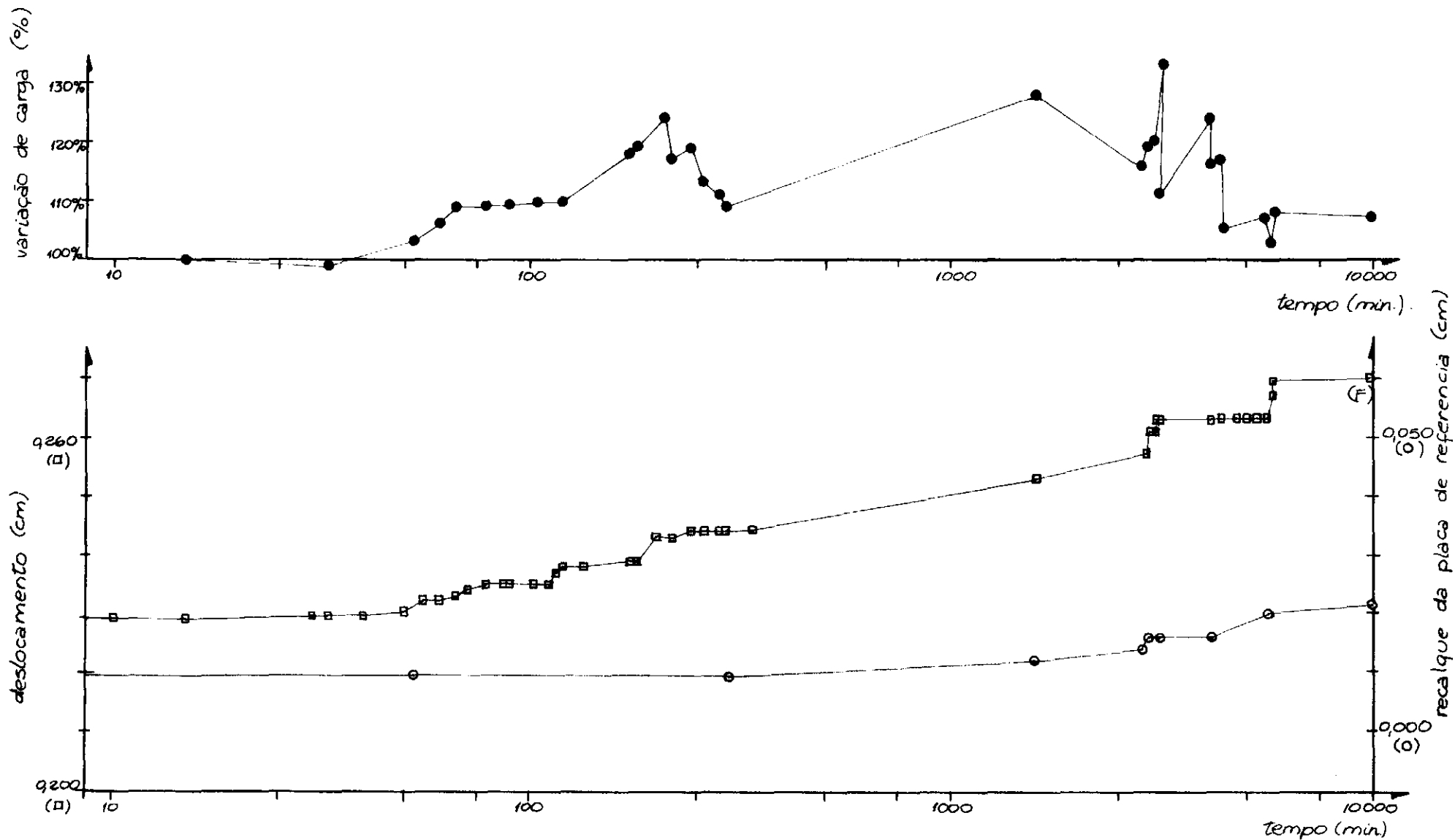


FIG. V. 146 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO II, CONTINUAÇÃO)

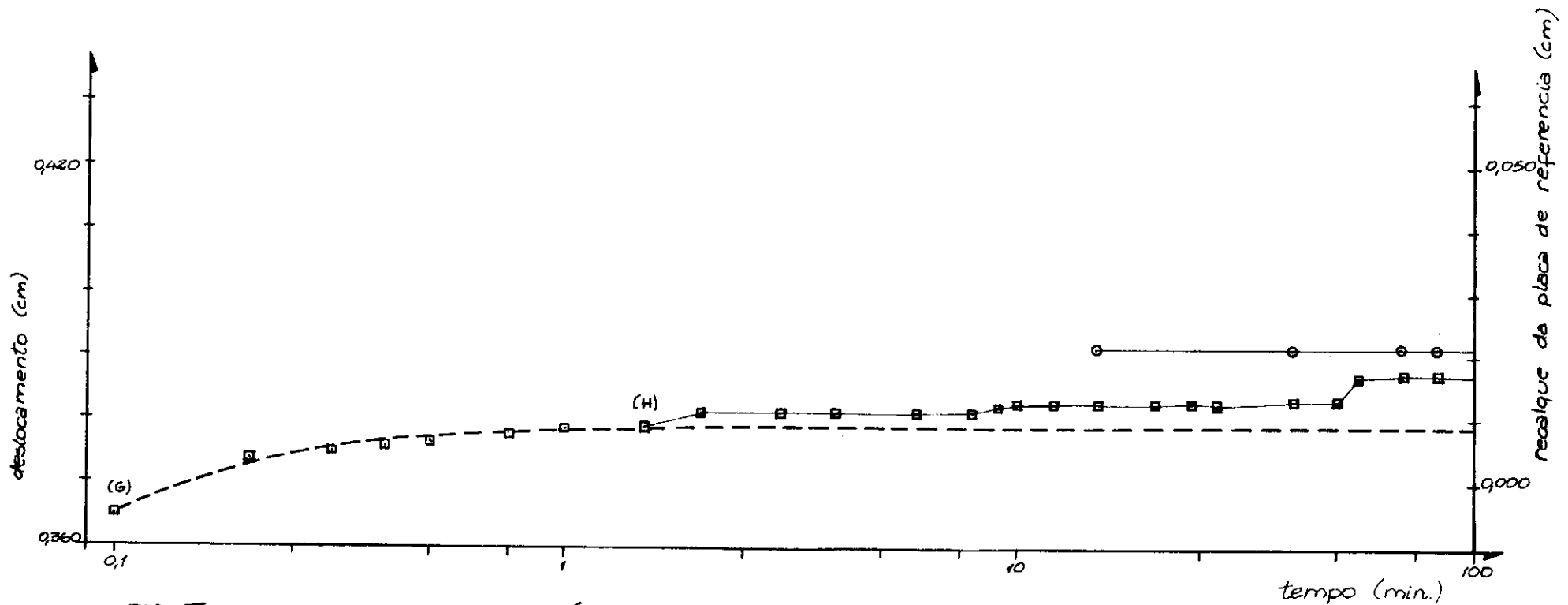
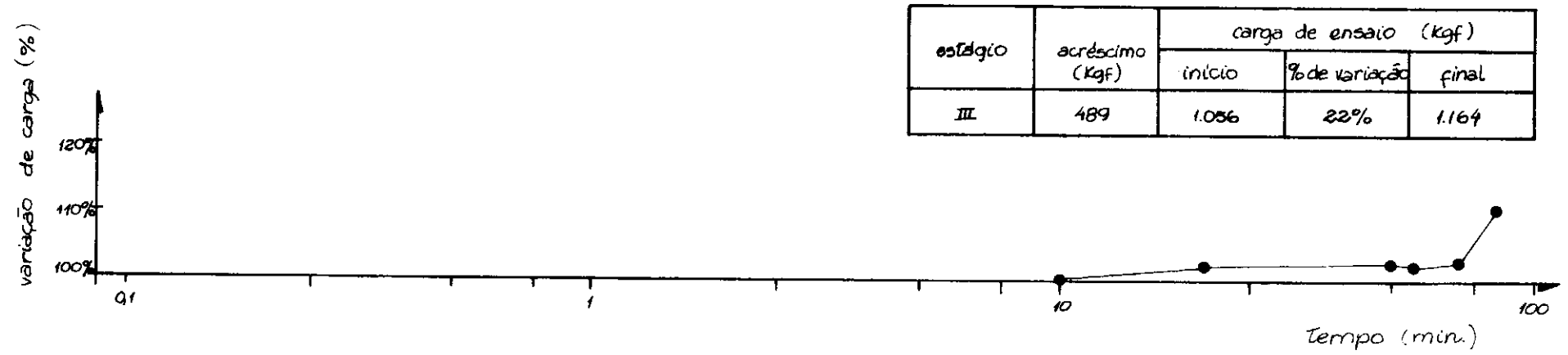


FIG. V. 15a TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO III).

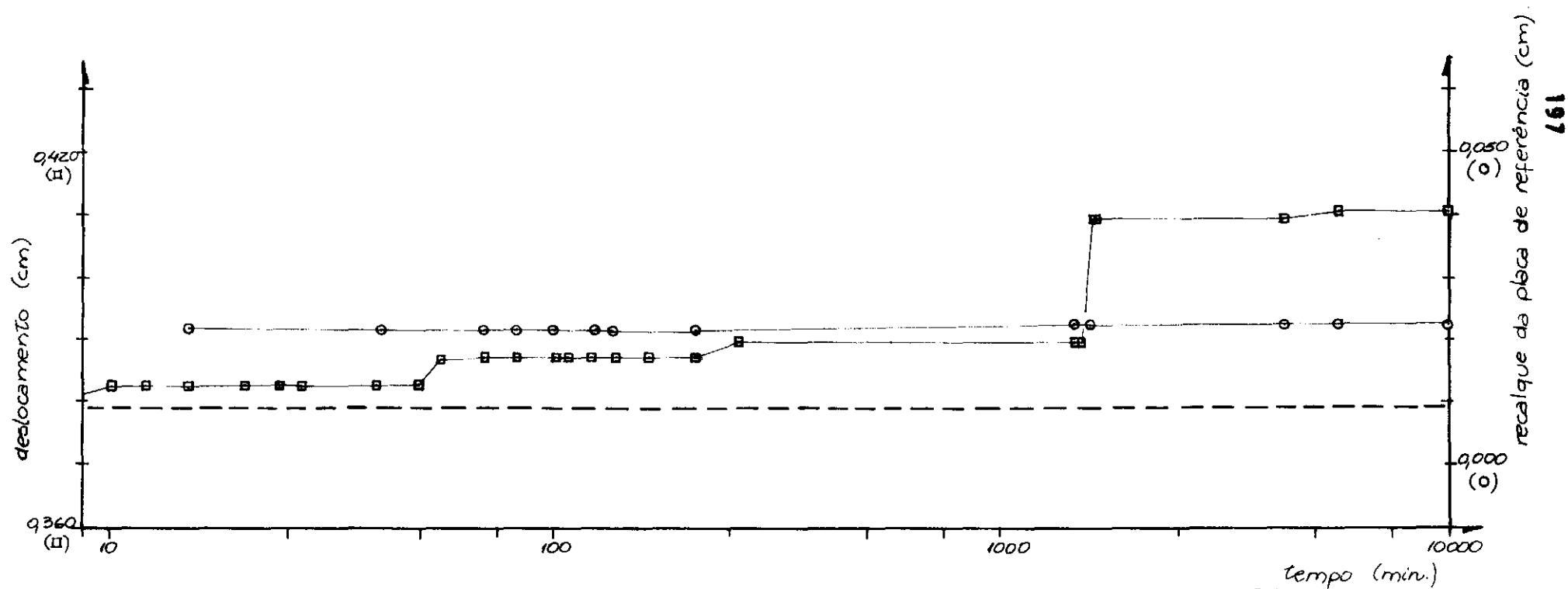
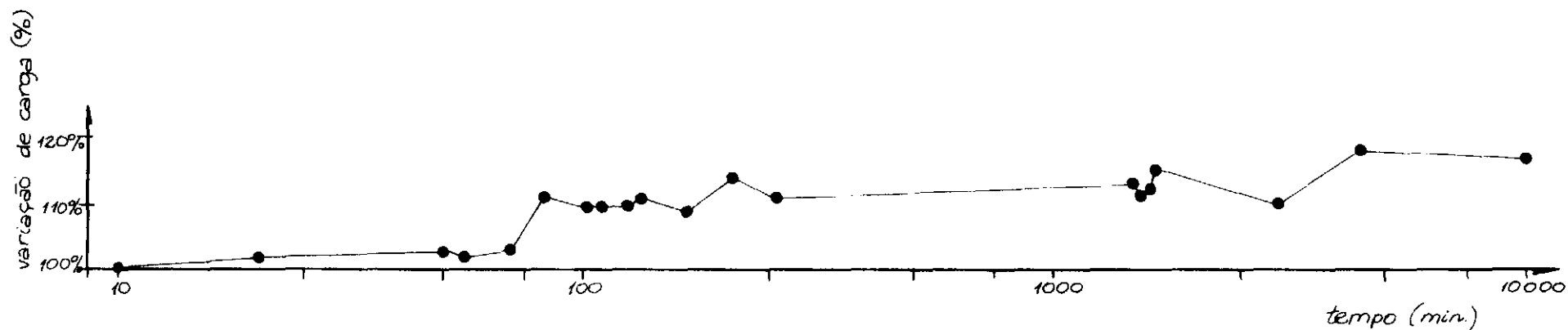


FIG. V.15 b TIRANTE 5-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO III, CONTINUAÇÃO)

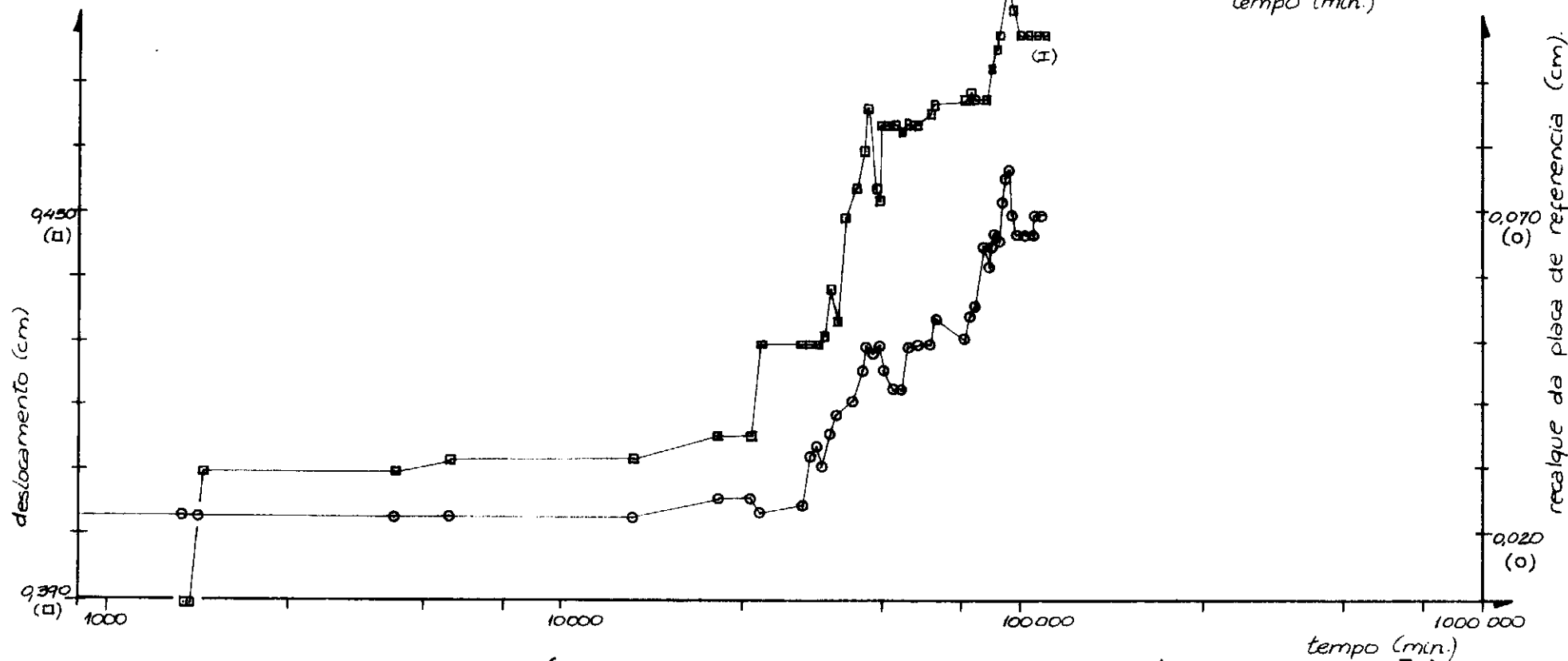
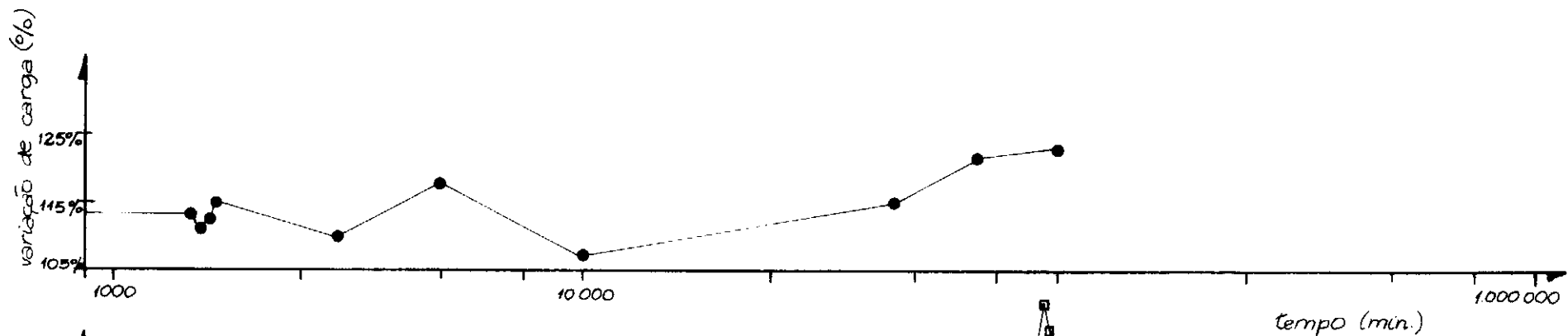


FIG. V. 13c TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO III, CONTINUAÇÃO)

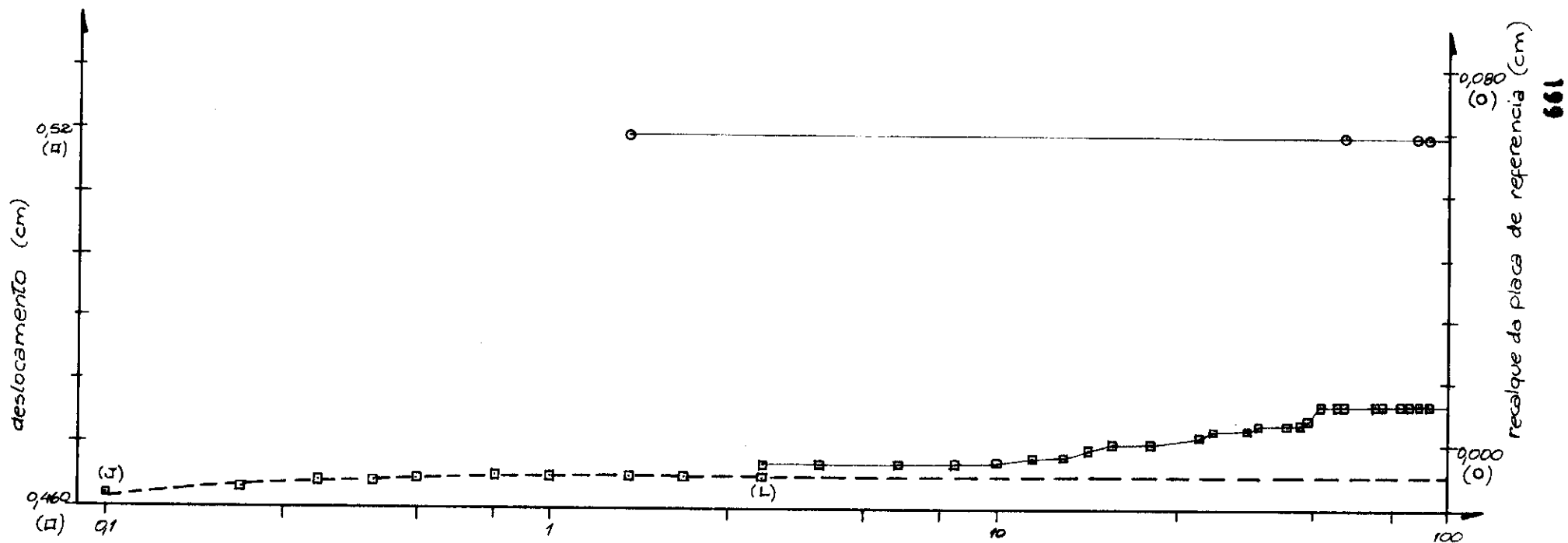
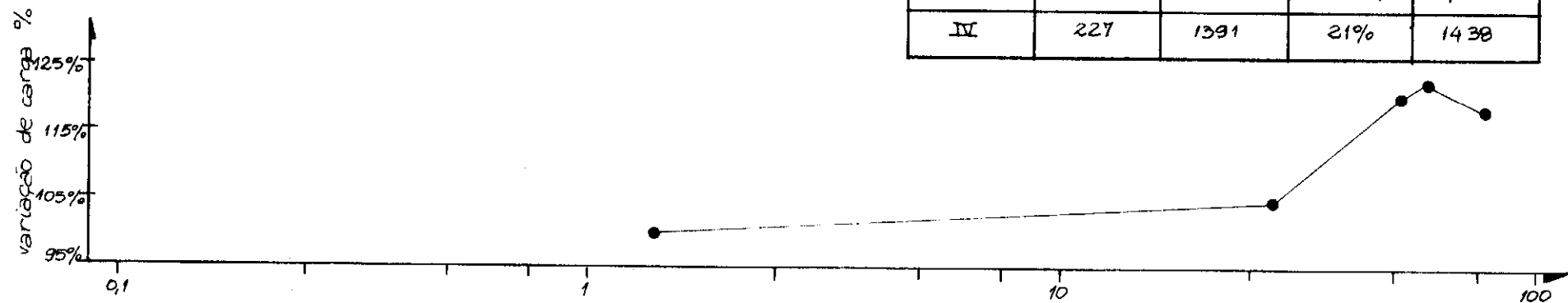


FIG. V.16 a TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO IV).

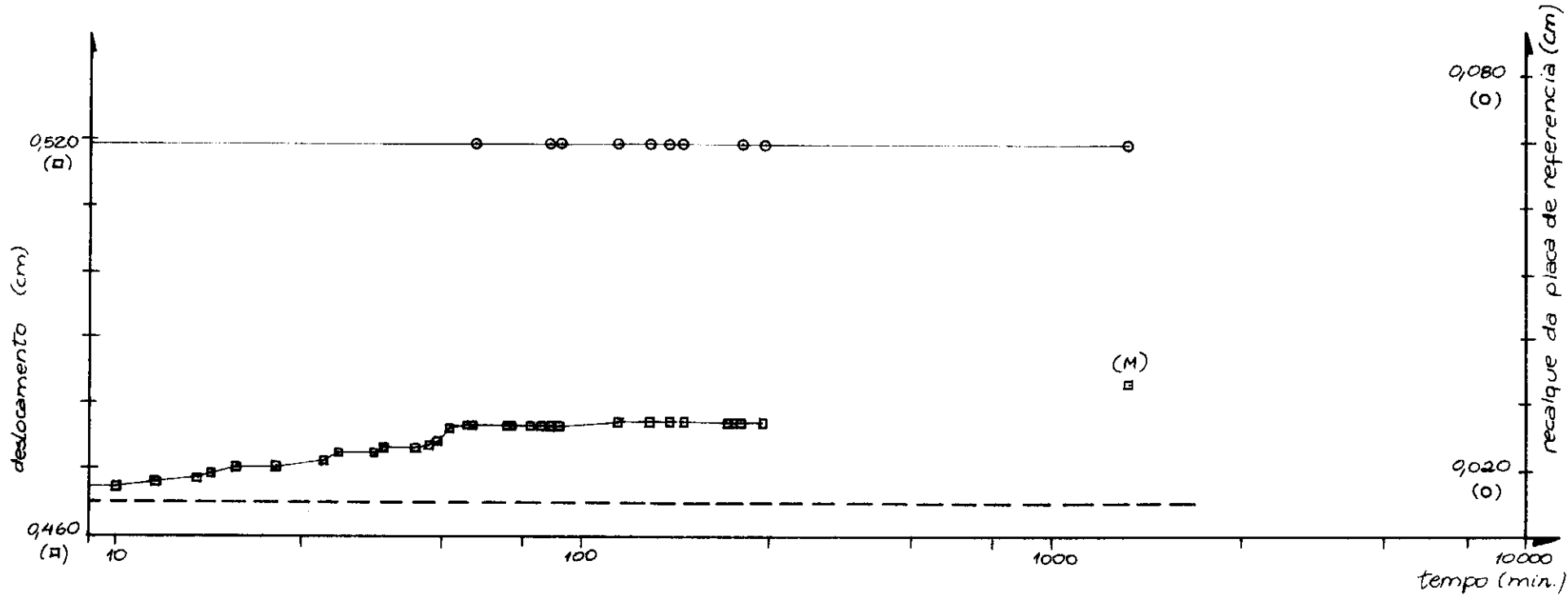
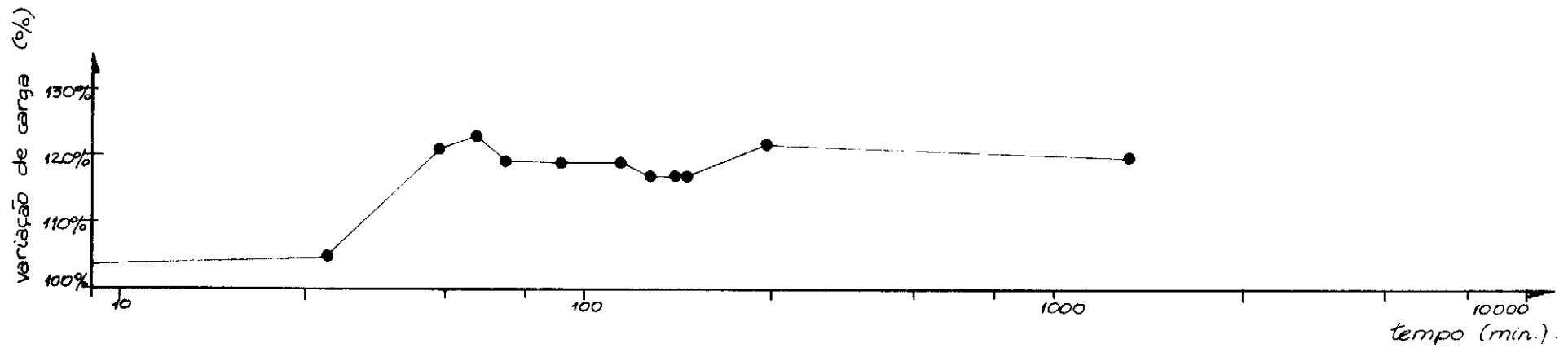


FIG. V.16b. TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO IV, CONTINUAÇÃO).

| estágio | acréscimo<br>(kgf) | carga de ensaio (kgf) |               |       |
|---------|--------------------|-----------------------|---------------|-------|
|         |                    | início                | % de variação | final |
| V       | 228                | 1666                  | 26%           | 1726  |

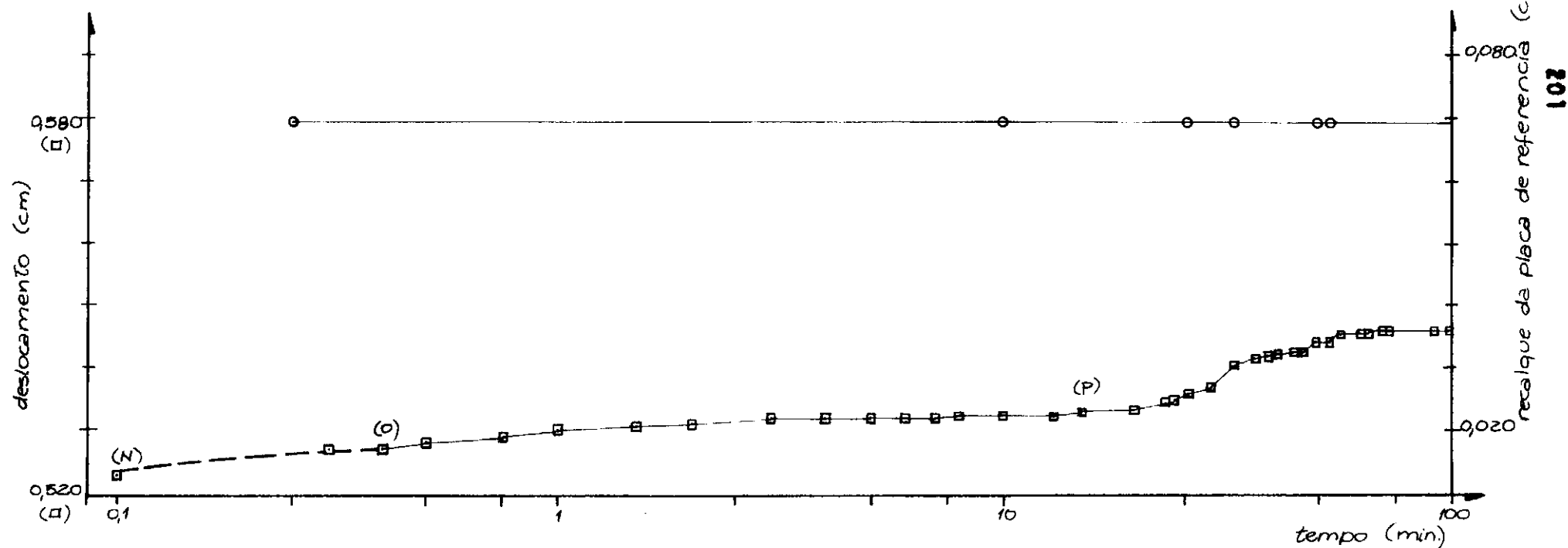
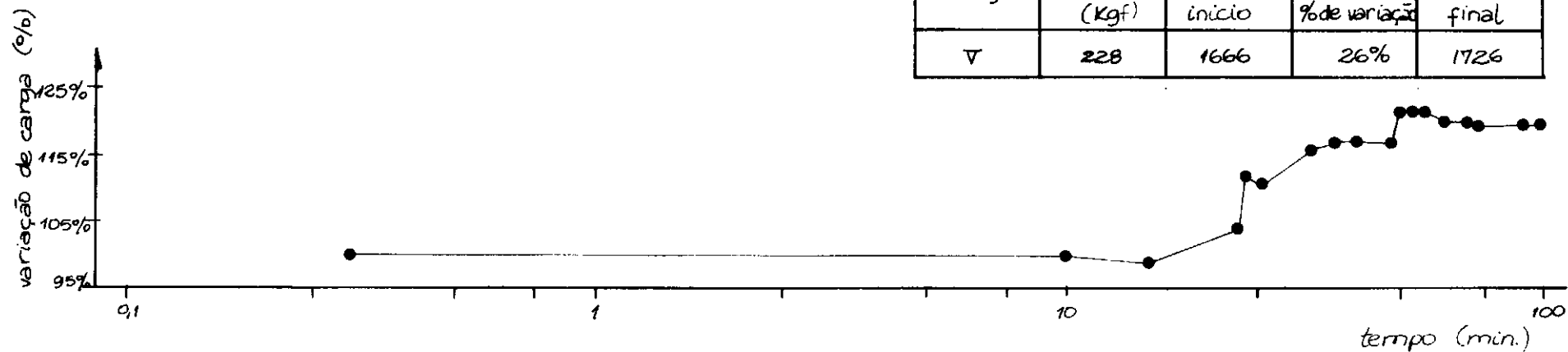


FIG. V.17a TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO II)



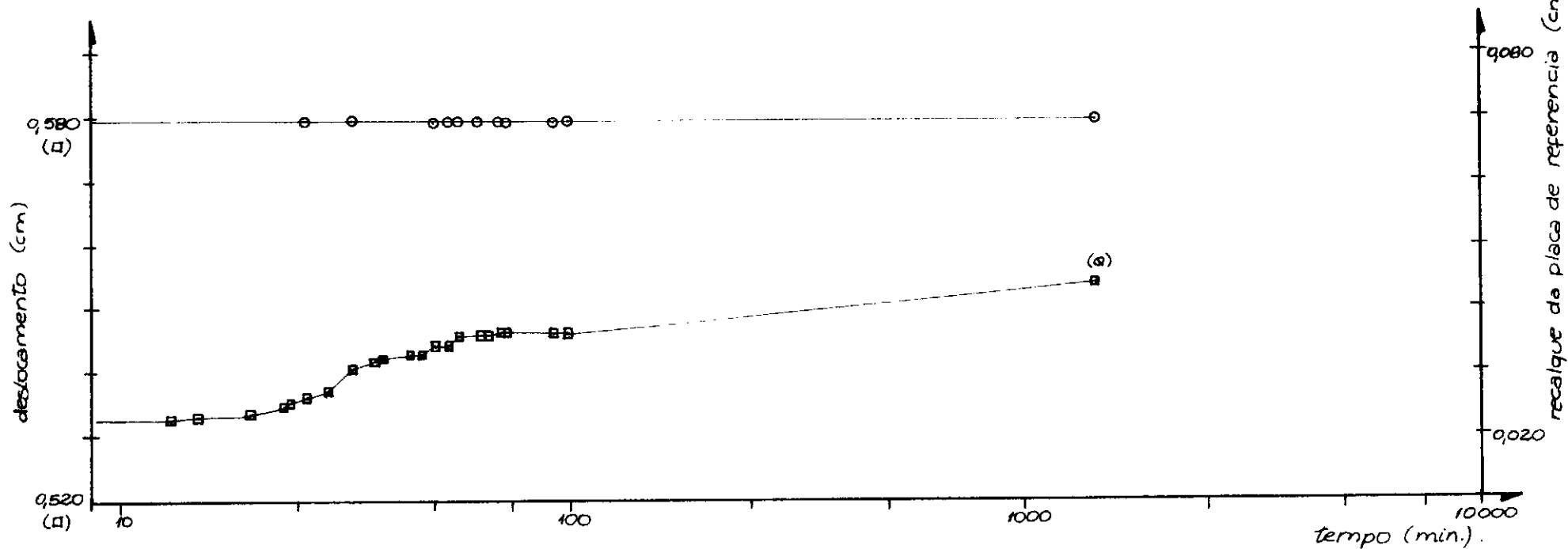
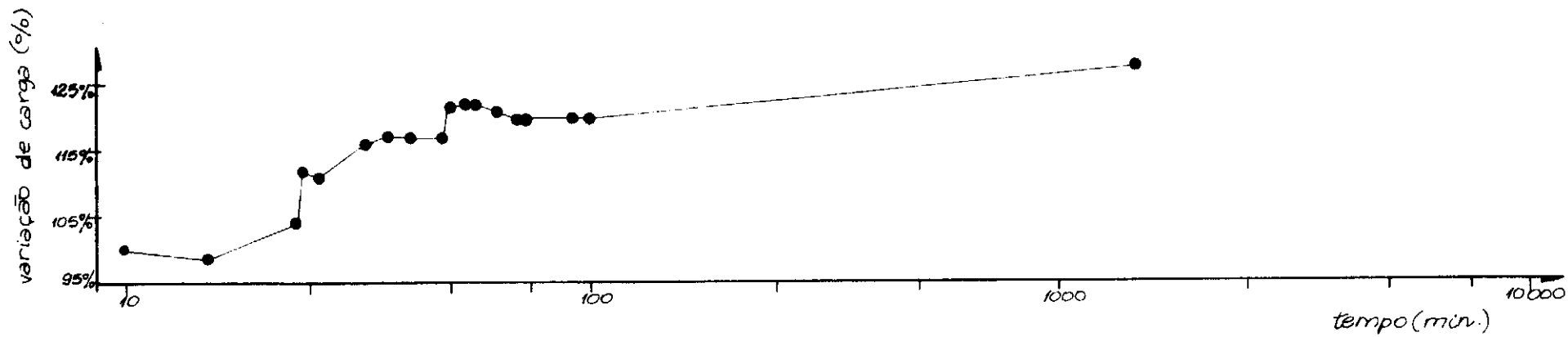


FIG. V.17b TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO V, CONTINUAÇÃO)

| estágio | acréscimo (kgf) | carga de ensaio (kgf) |               |       |
|---------|-----------------|-----------------------|---------------|-------|
|         |                 | início                | % de variação | final |
| VI      | 458             | 2181                  | -3%           | 2170  |

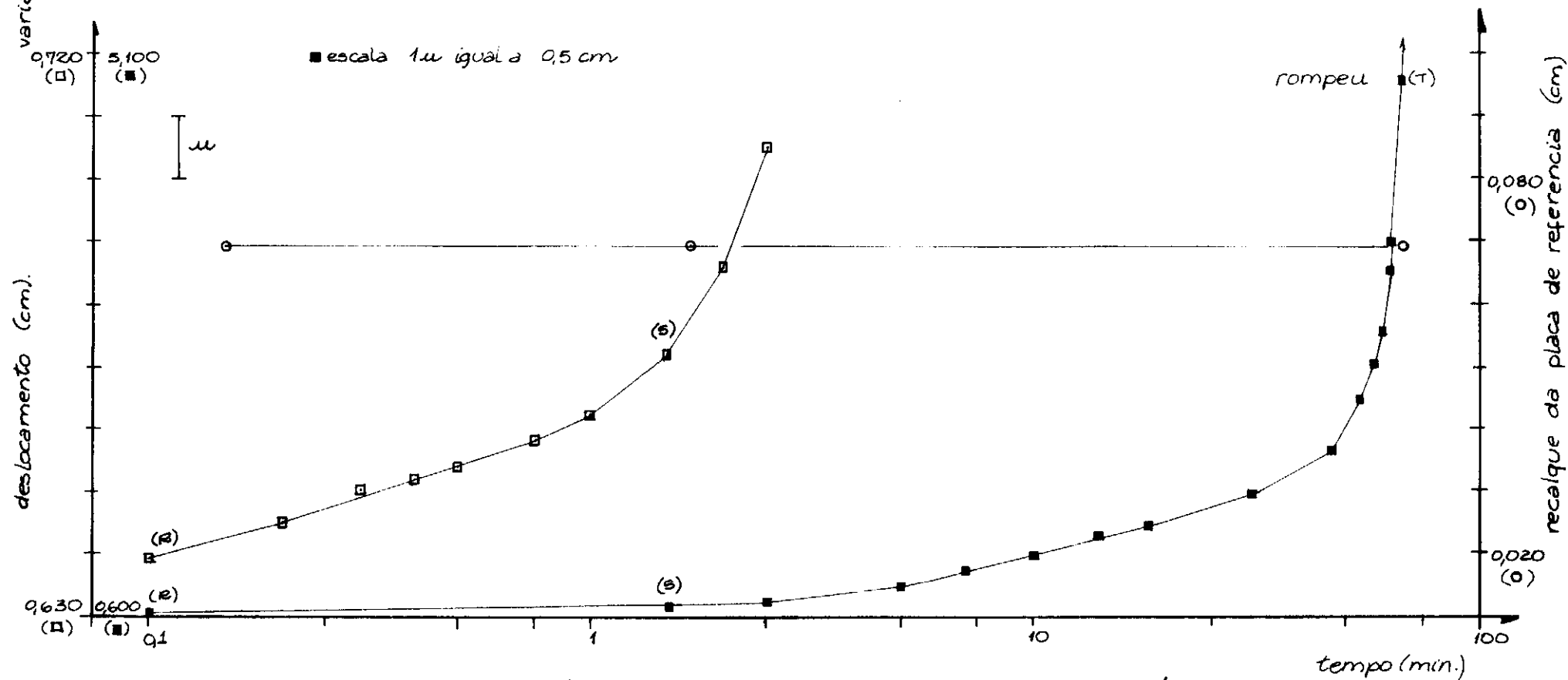
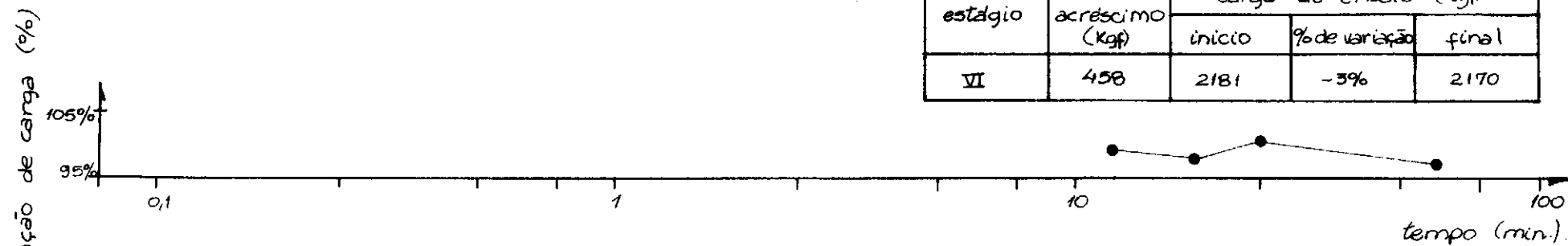


FIG. V. 18 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO VI)

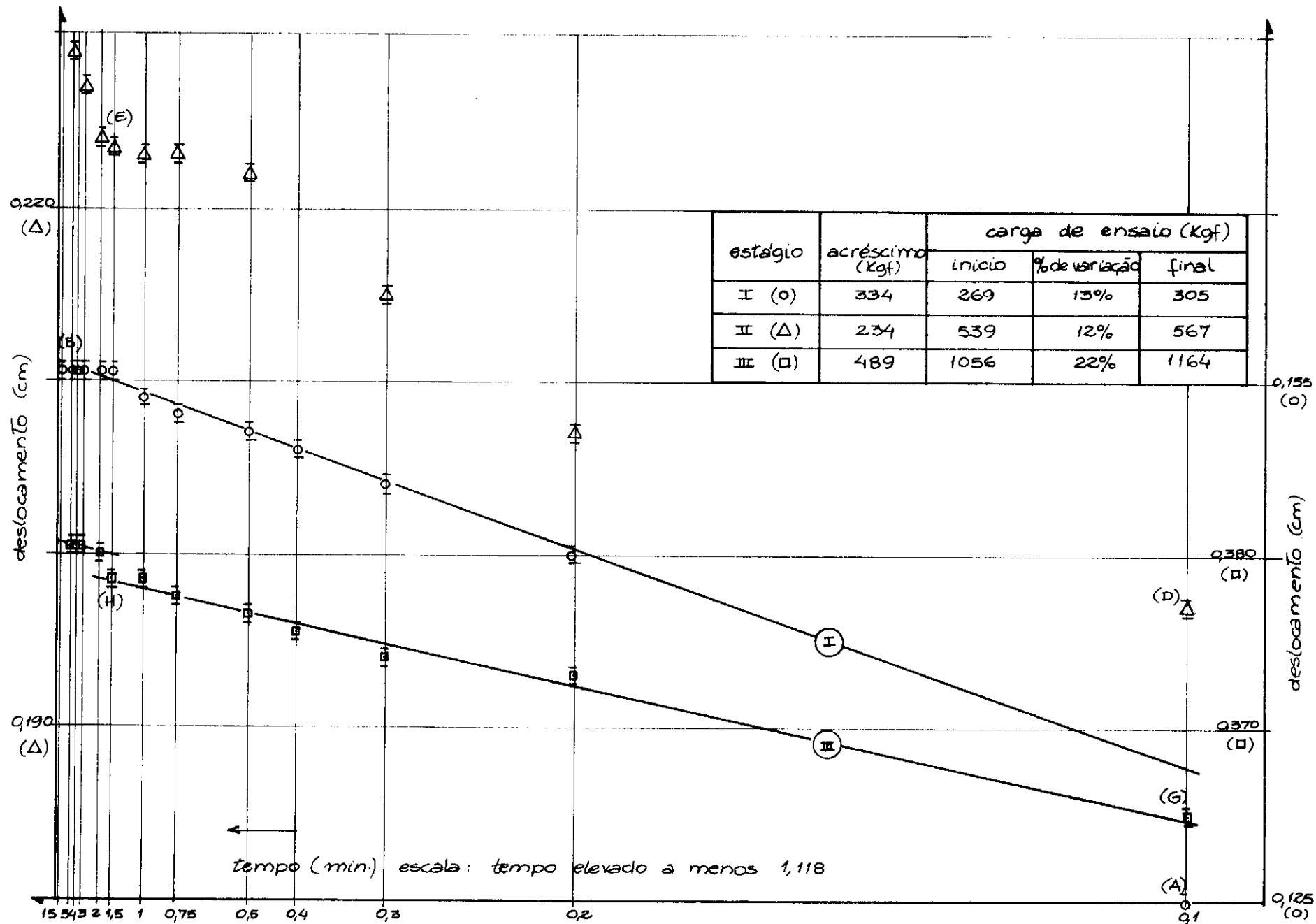


FIG. V.19 TIRANTE 5-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIOS I, II E III)

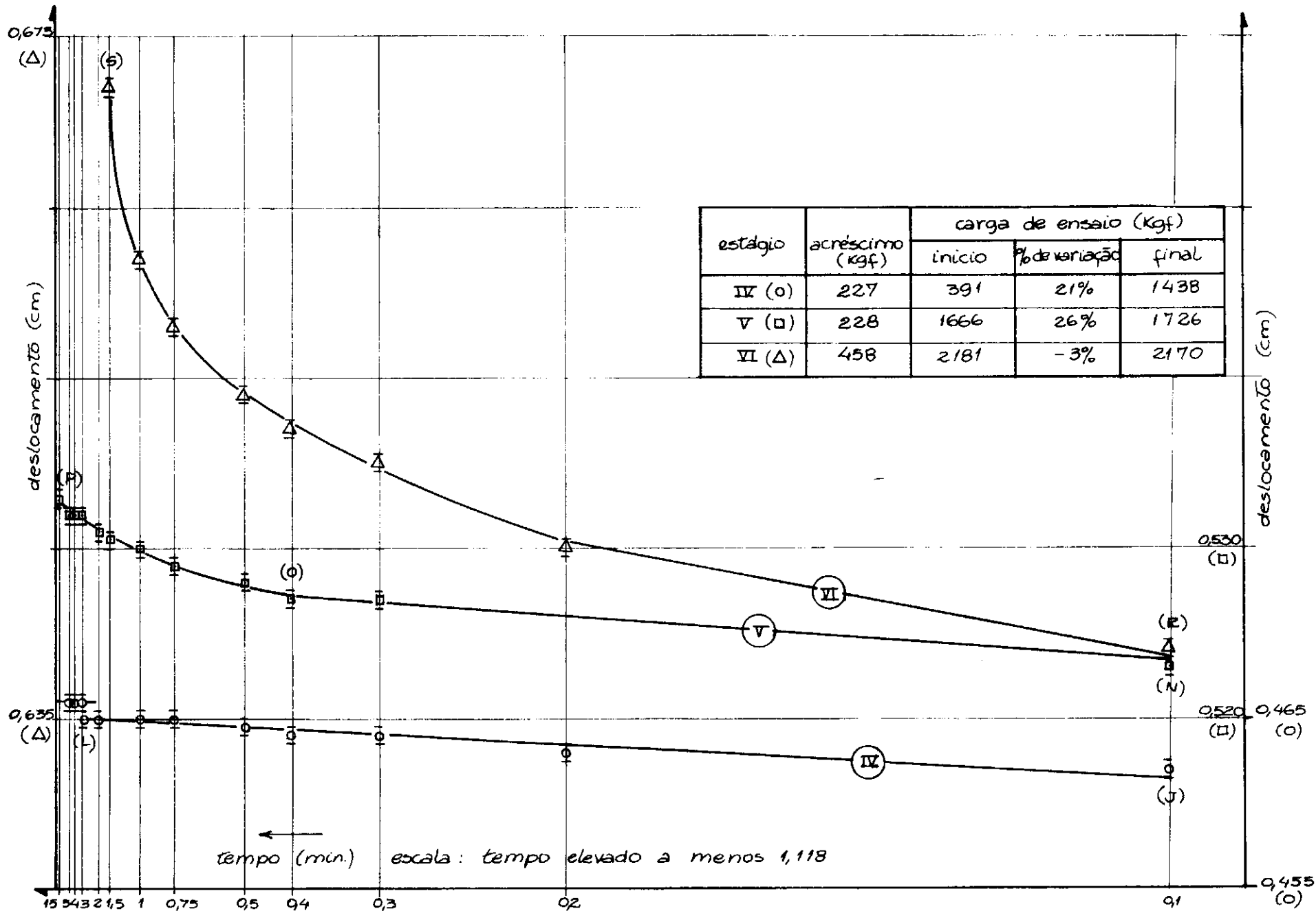


FIG. V.20 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO IV, V e VI).

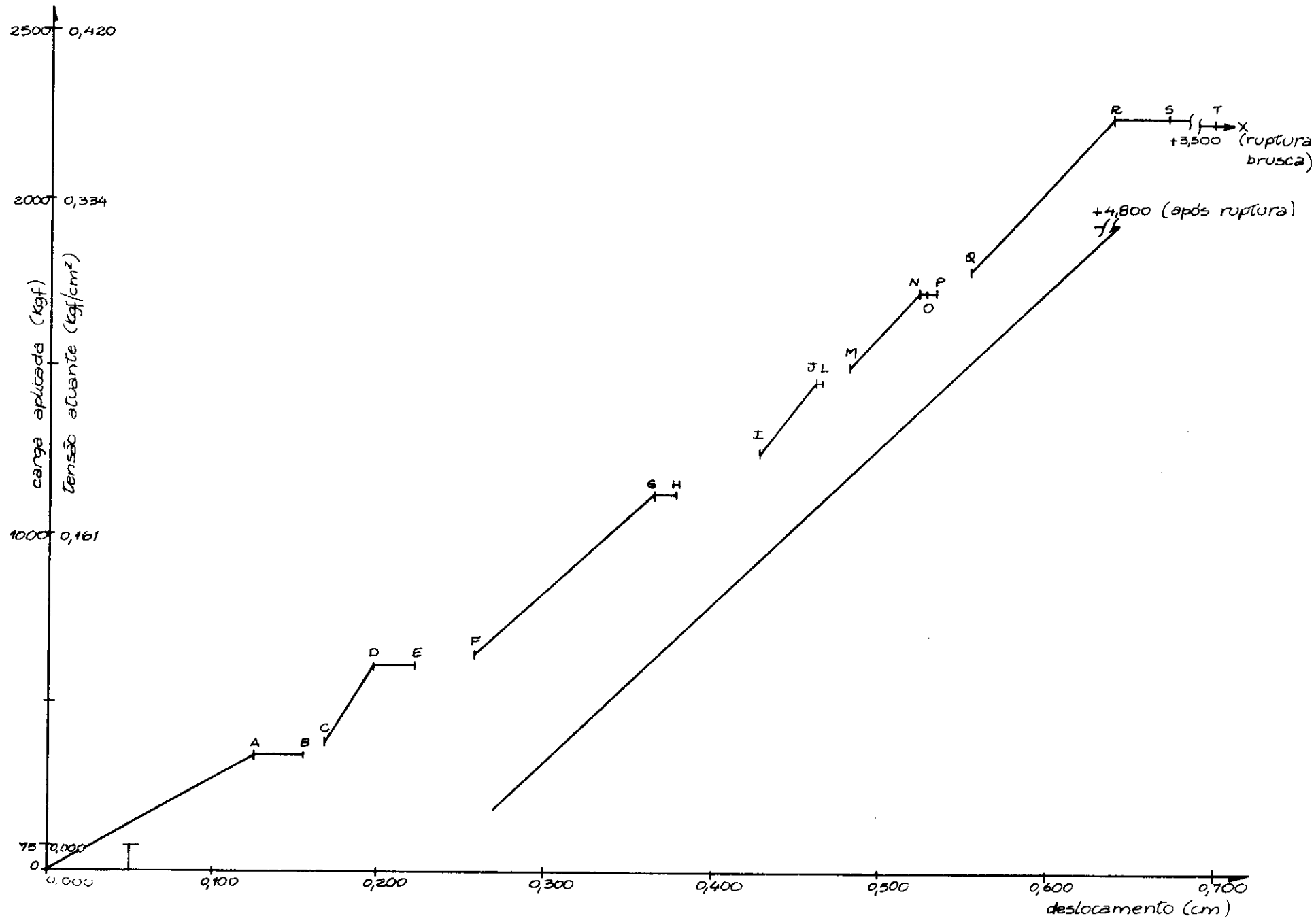


FIG. V.21 TIRANTE S-1 TIPO-I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO).

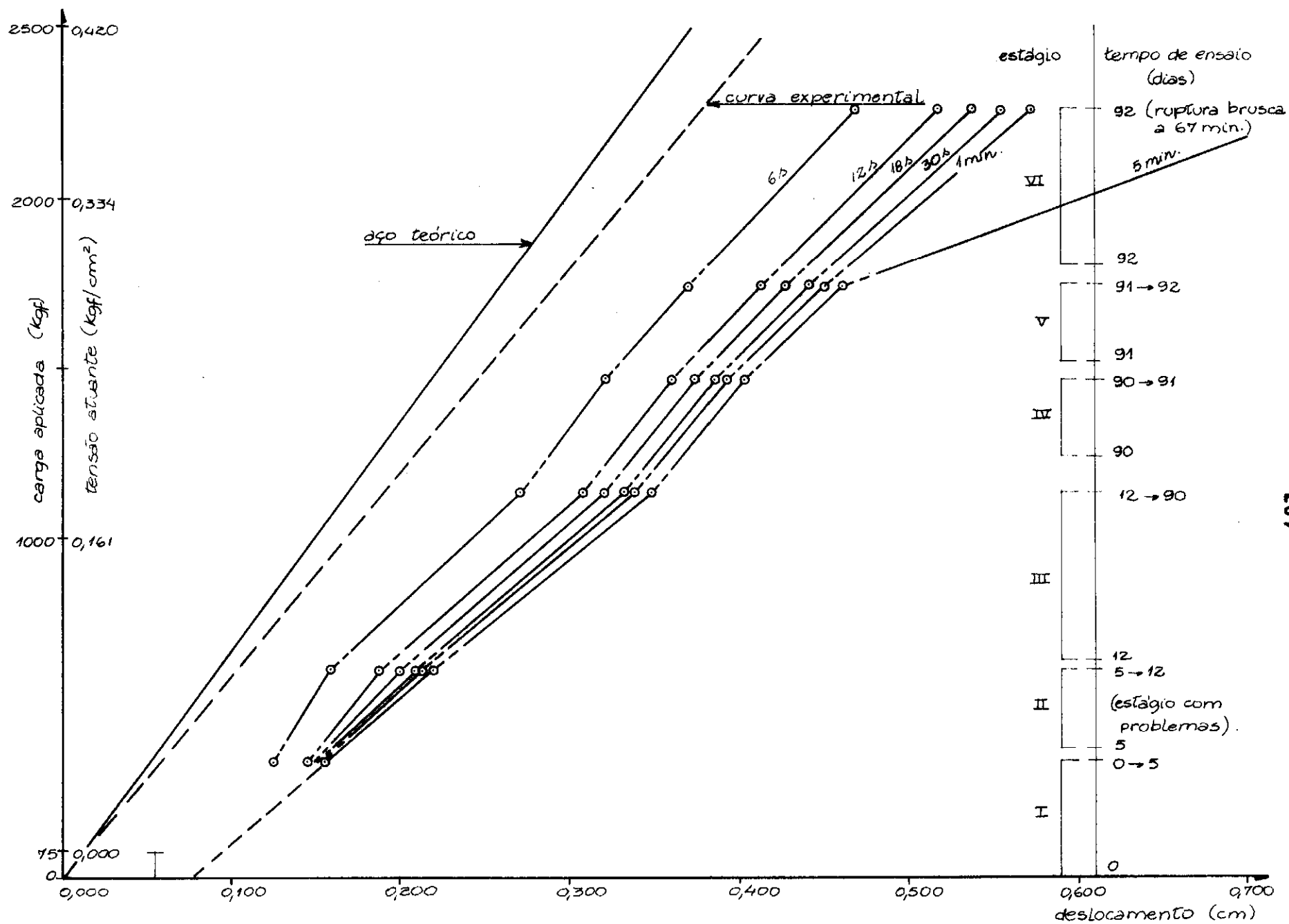


FIG. V.22 TIRANTE 5-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO)

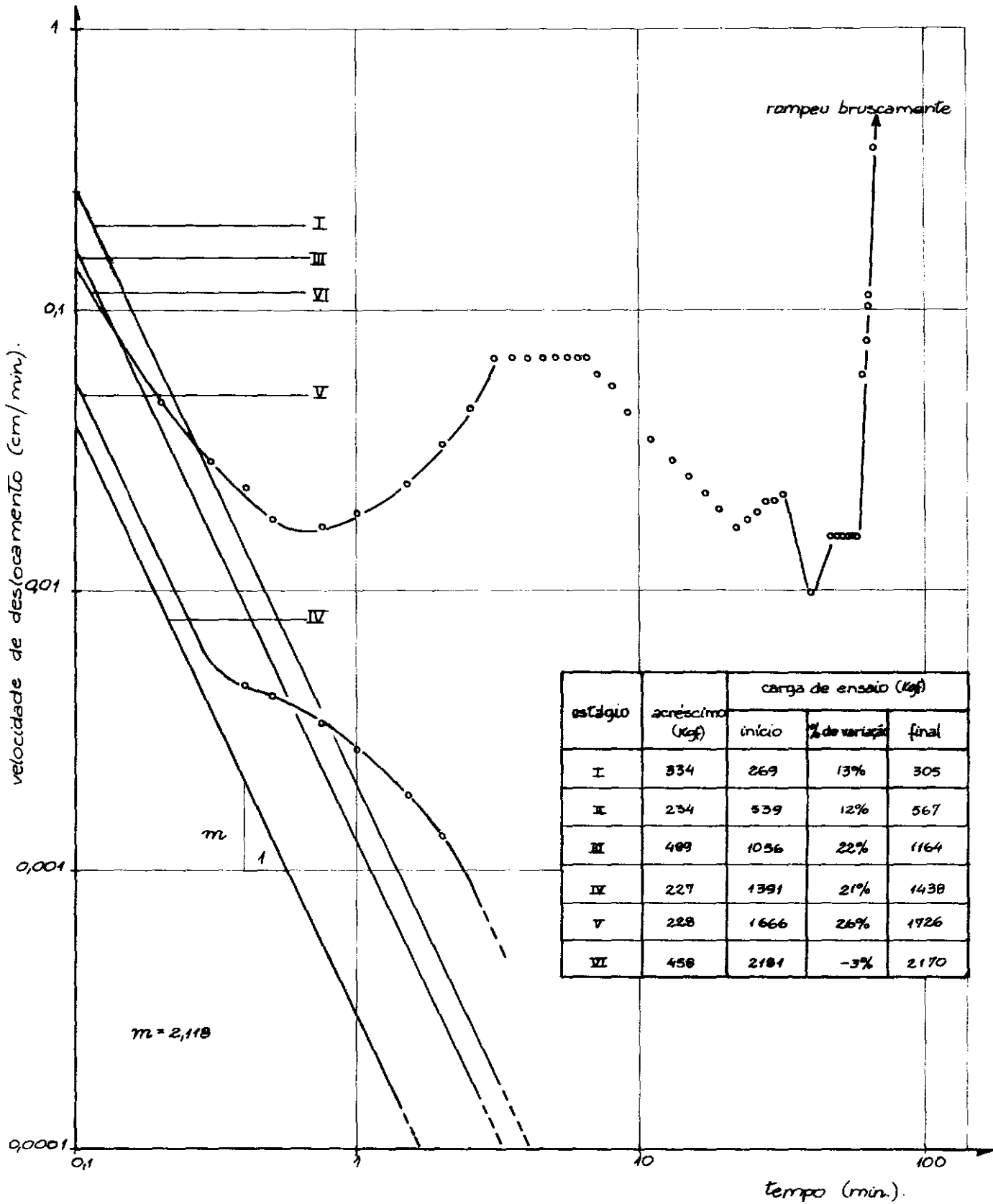


FIG. V.23 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO).

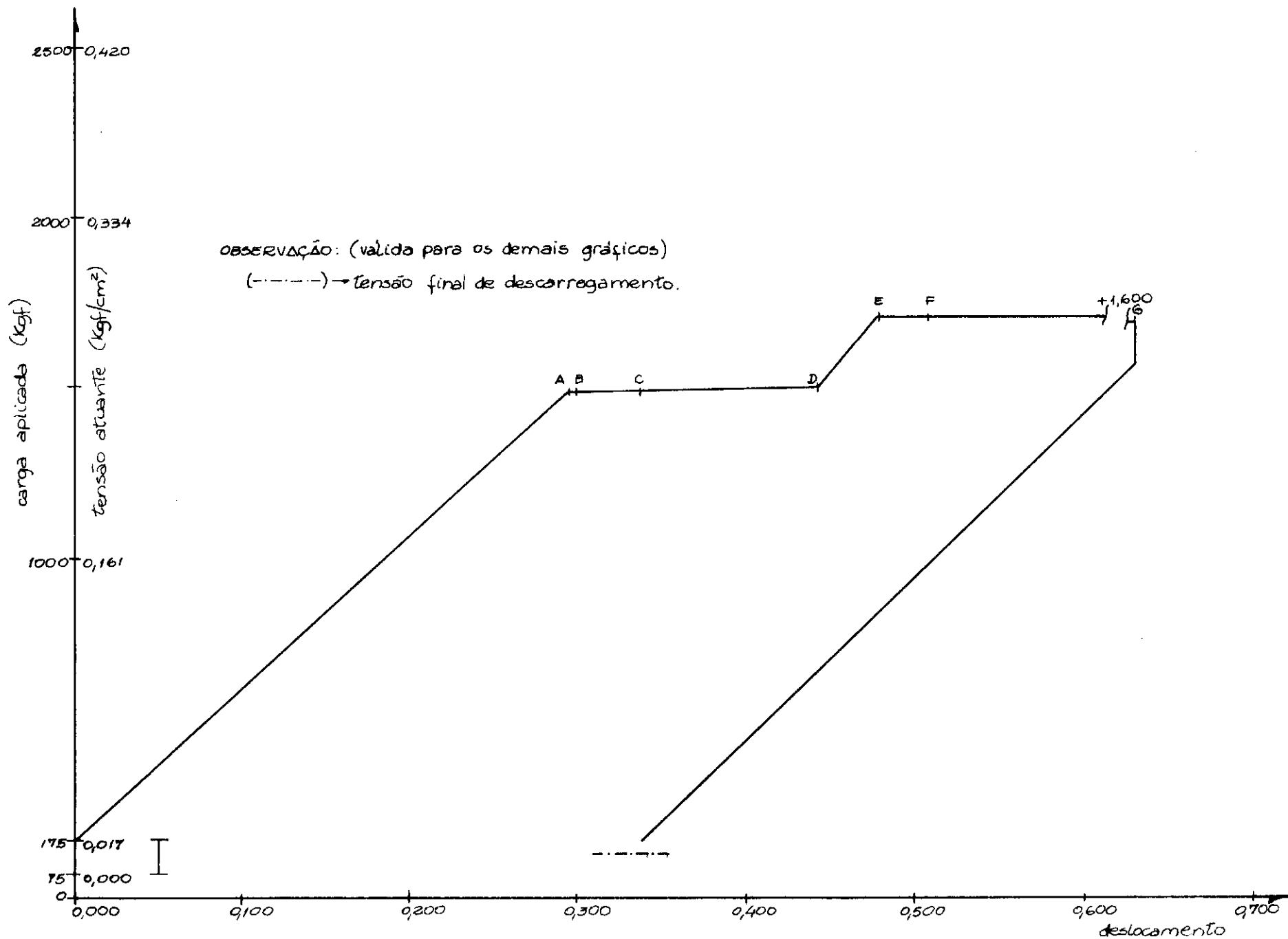


FIG. V. 24 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO -A).



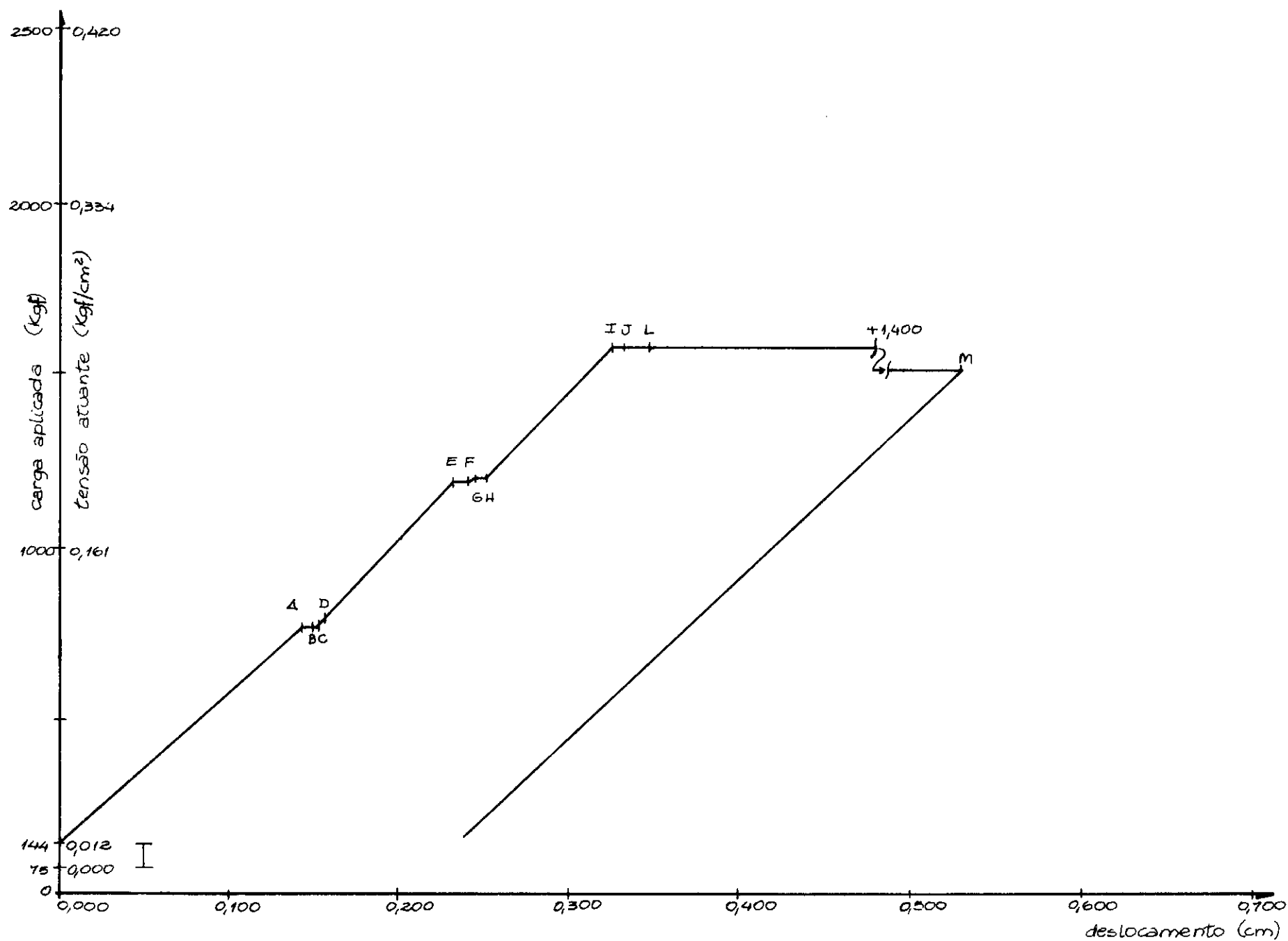


FIG. V.25 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO C)

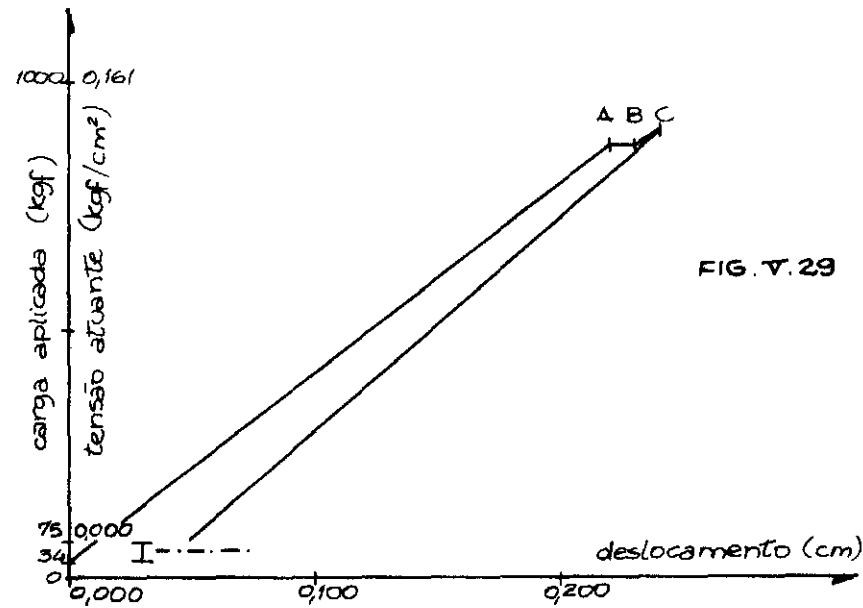
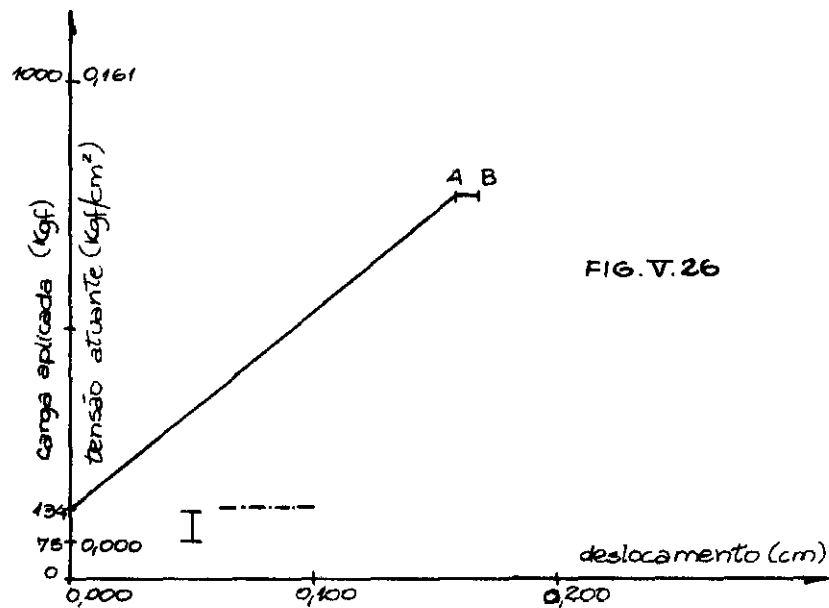
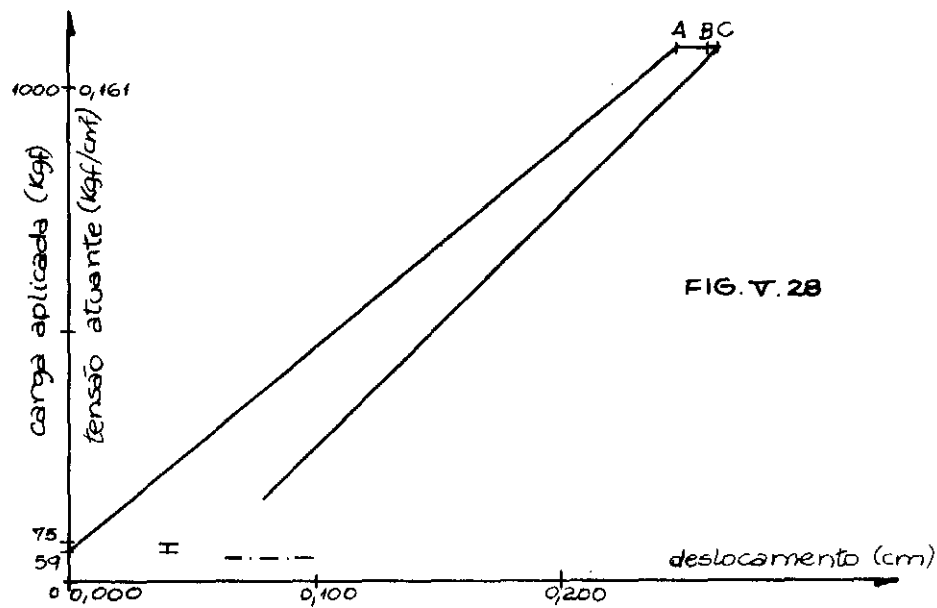
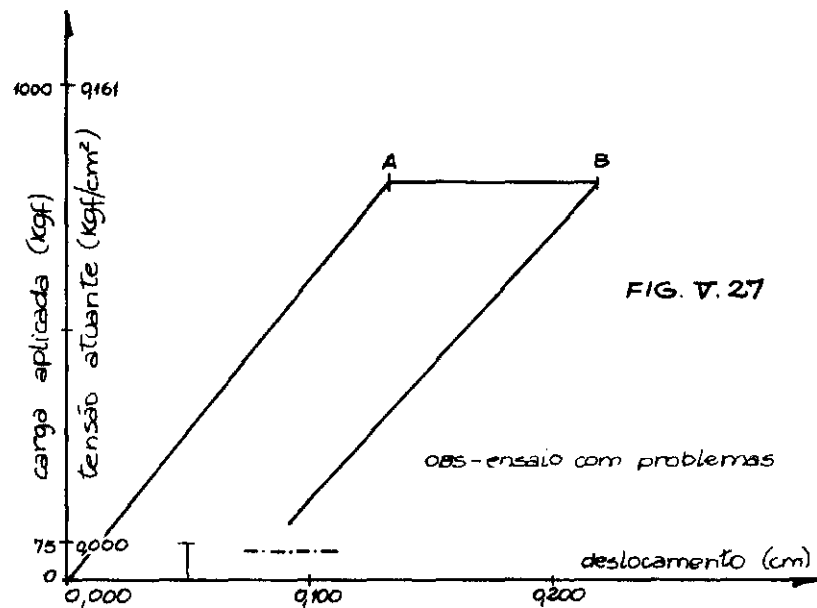


FIG. V. 26, V. 27, V. 28, V. 29 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO B, D-1, D-2 E D-4, RESPECTIVAMENTE).

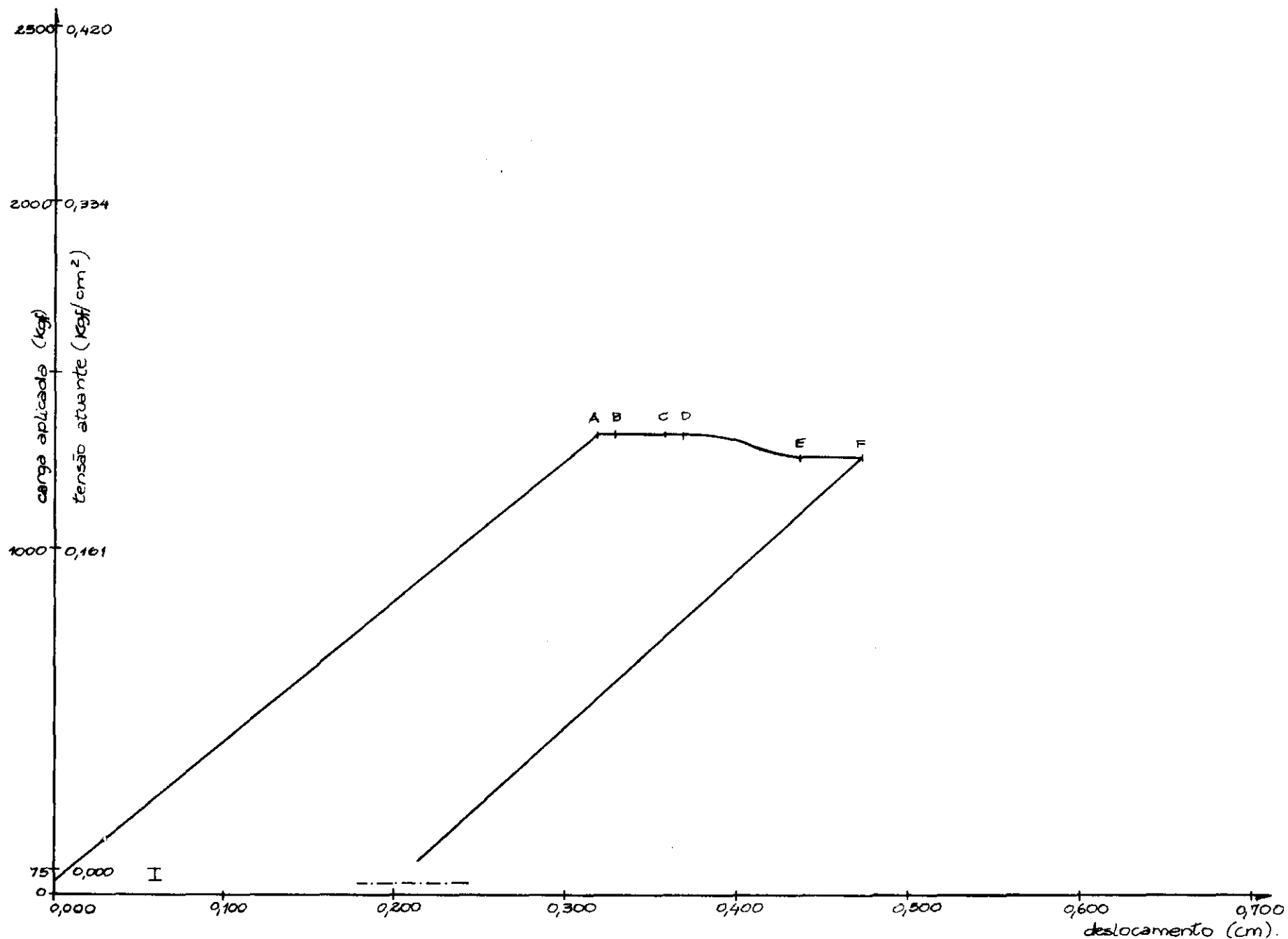


FIG. V.30 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO D-3)

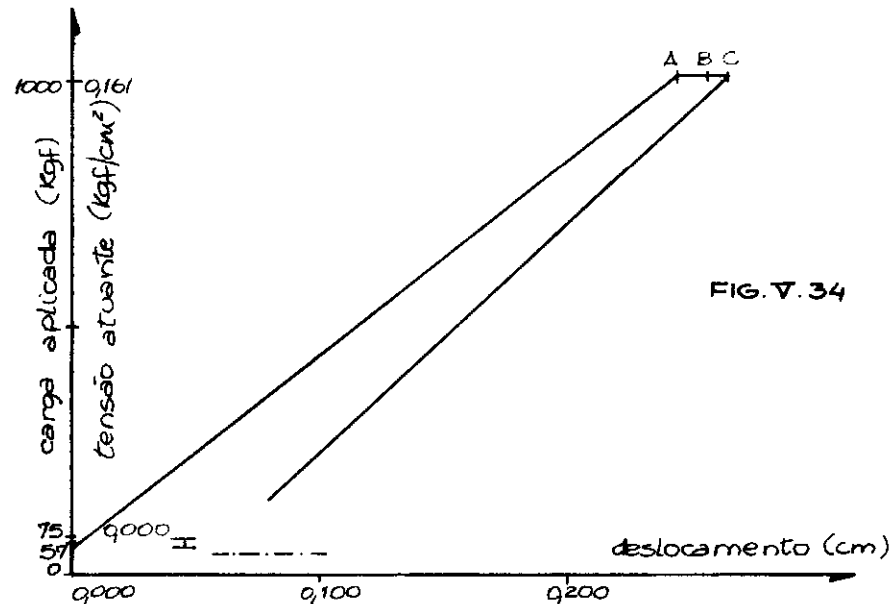
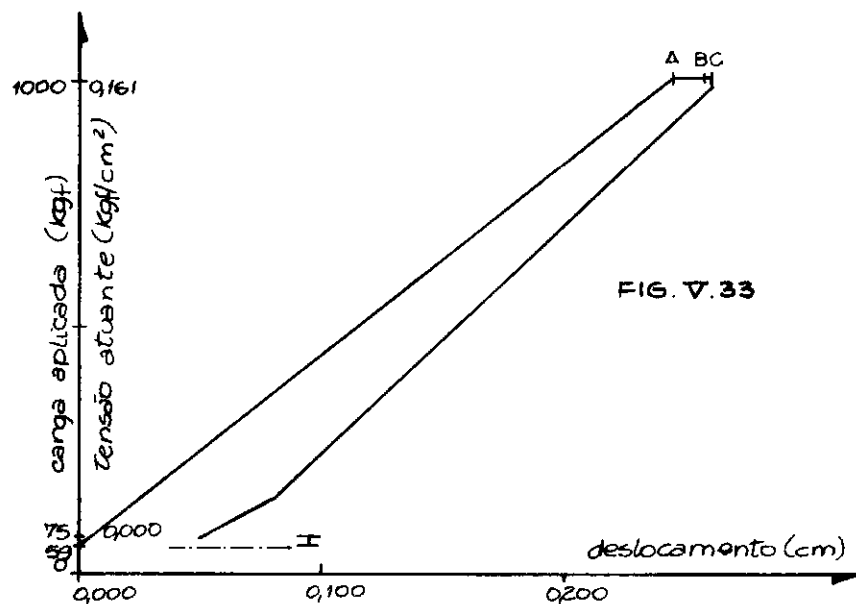
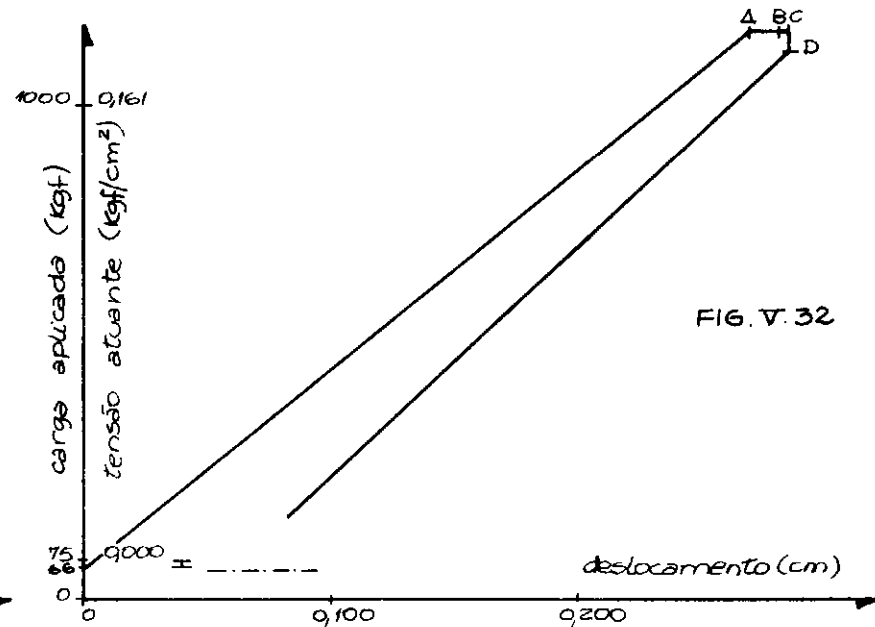
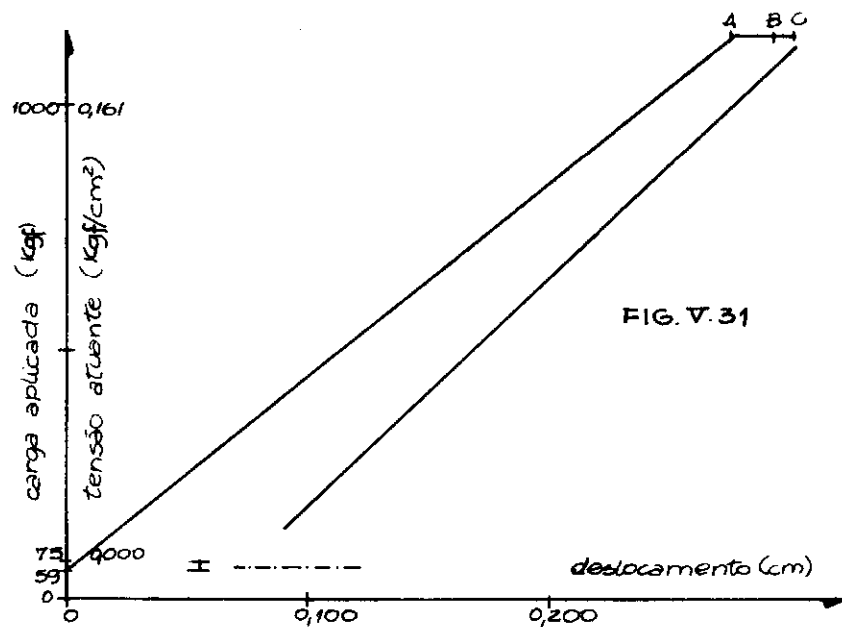


FIG. V.31, V.32, V.33, V.34 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO D-5, D-6, D-7 E D-8, RESPECTIVAMENTE).

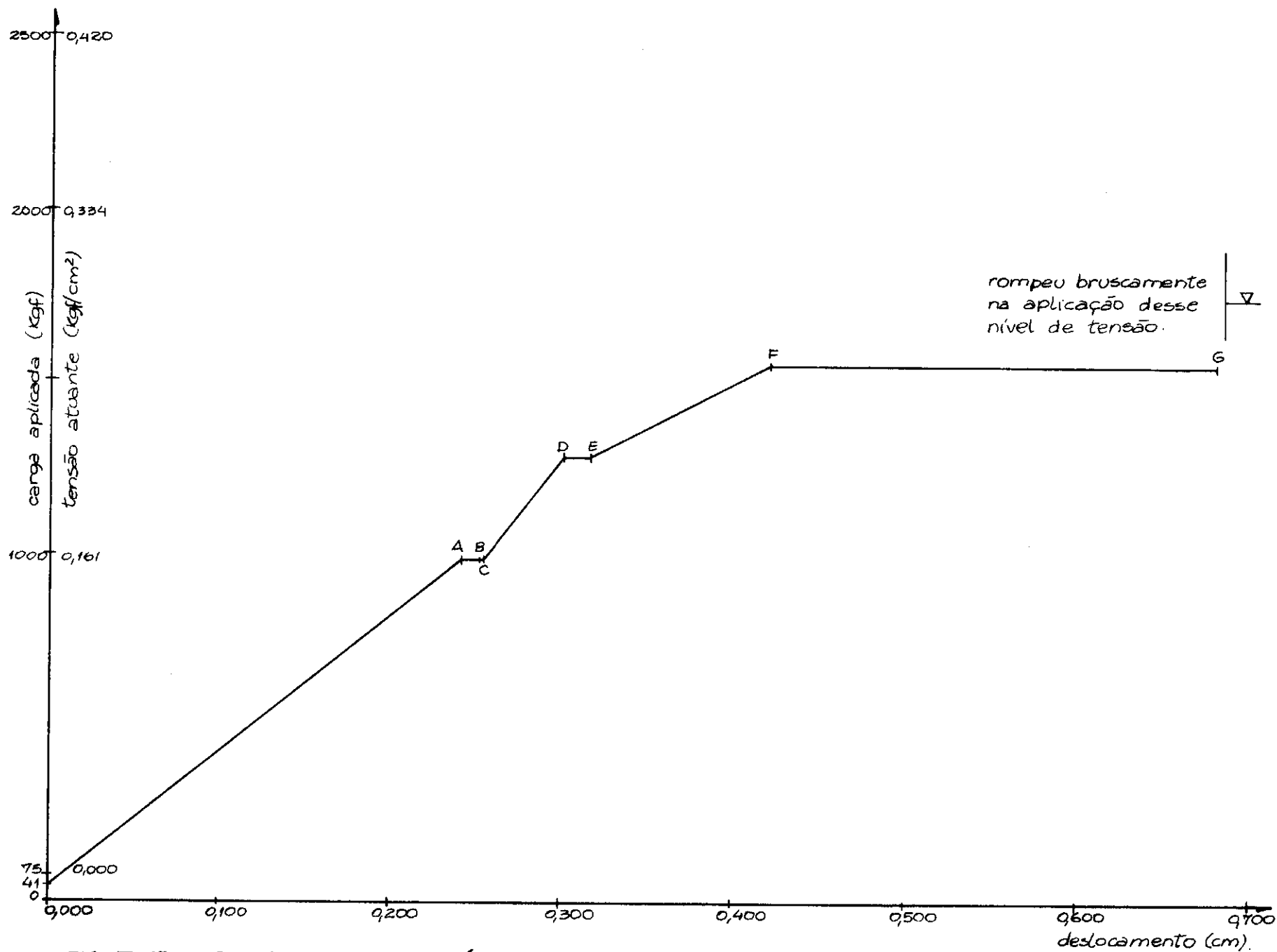


FIG. V.35 TIRANTE 3-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO E)

variação de carga (%)

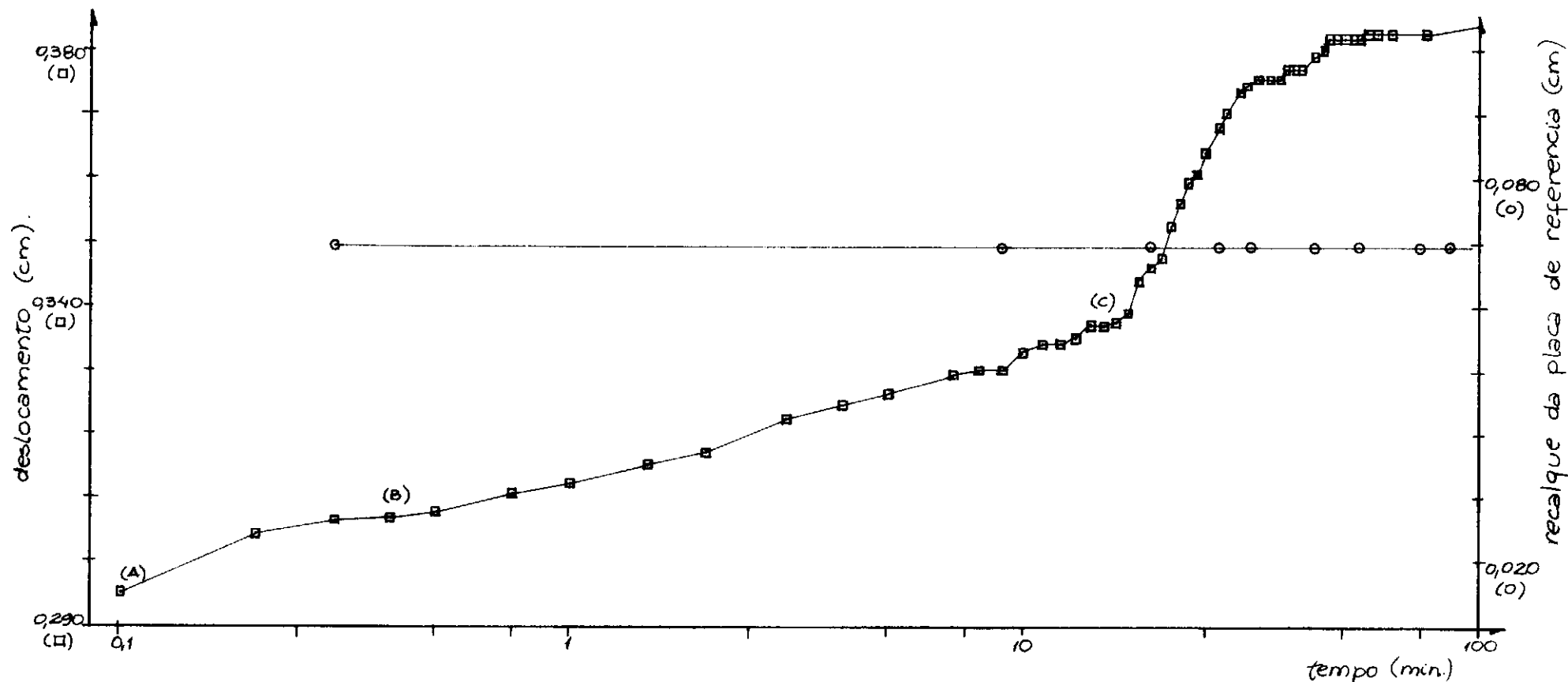


FIG. V.36 a TIRANTE 8-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO A - ESTÁGIO A-1).

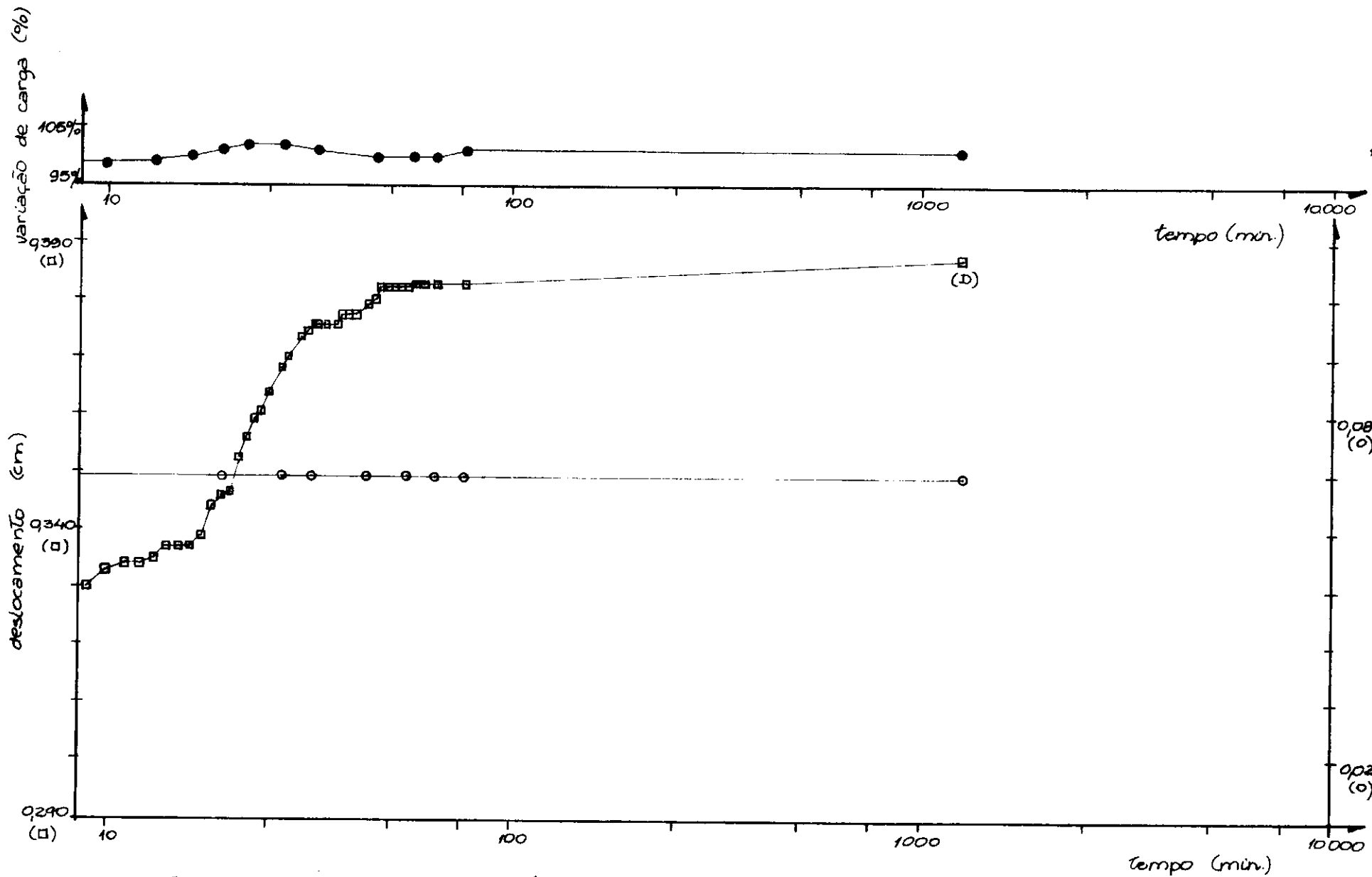


FIG. V. 36 b TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO A-ESTÁGIO A-1, CONTINUAÇÃO).

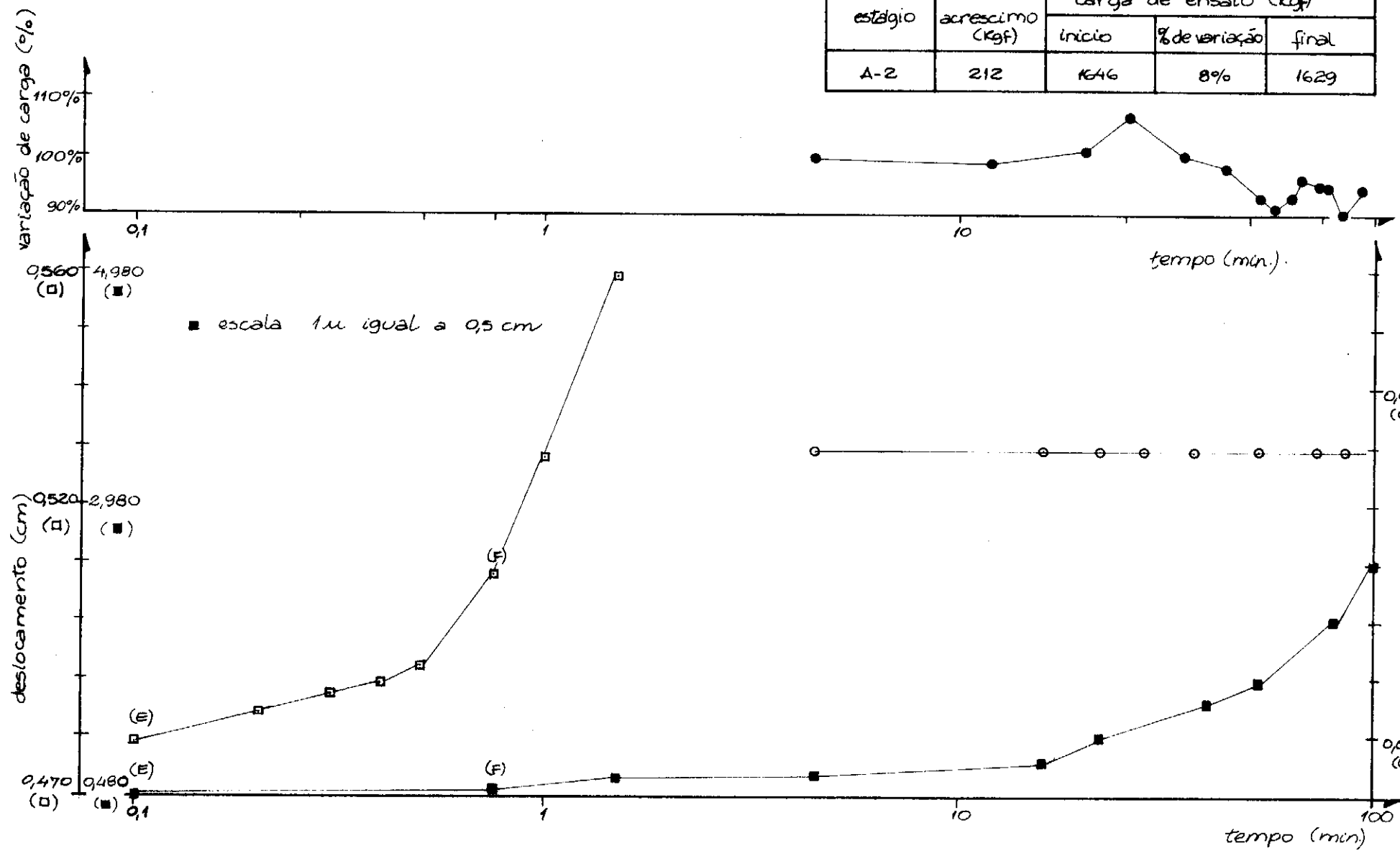


FIG. V.37 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO A - ESTÁGIO A-2)



variação de carga (%)

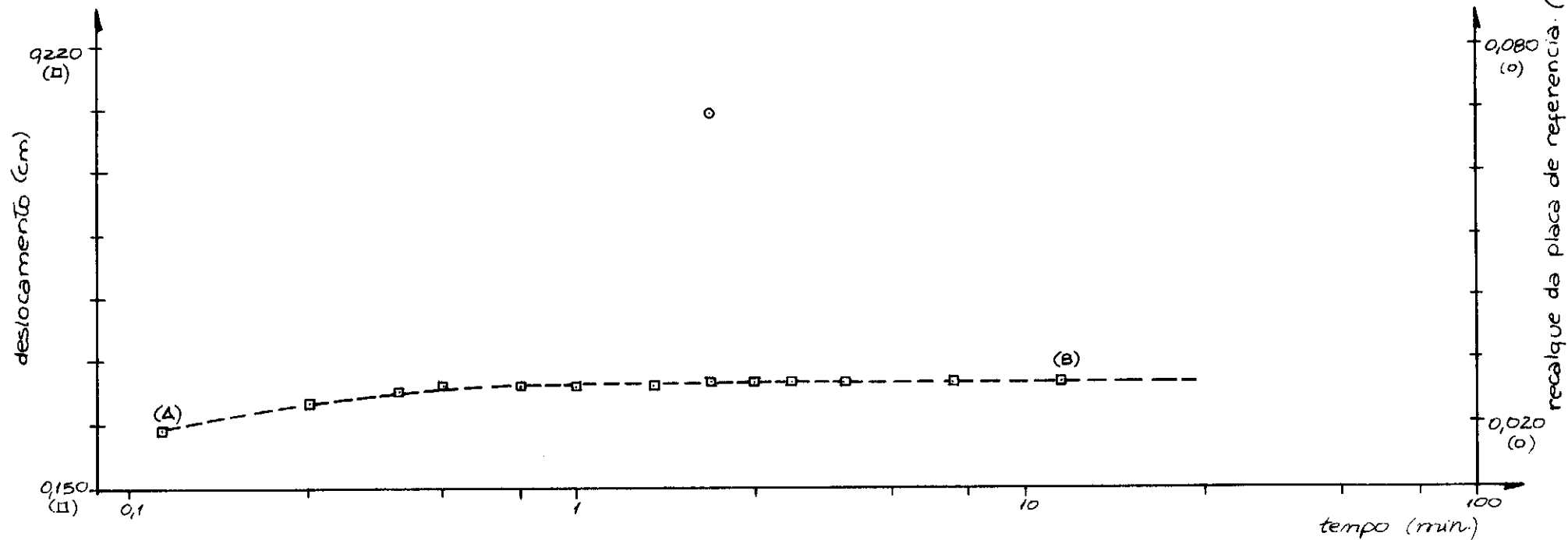


FIG. V. 38 TIRANTE 3-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO B)

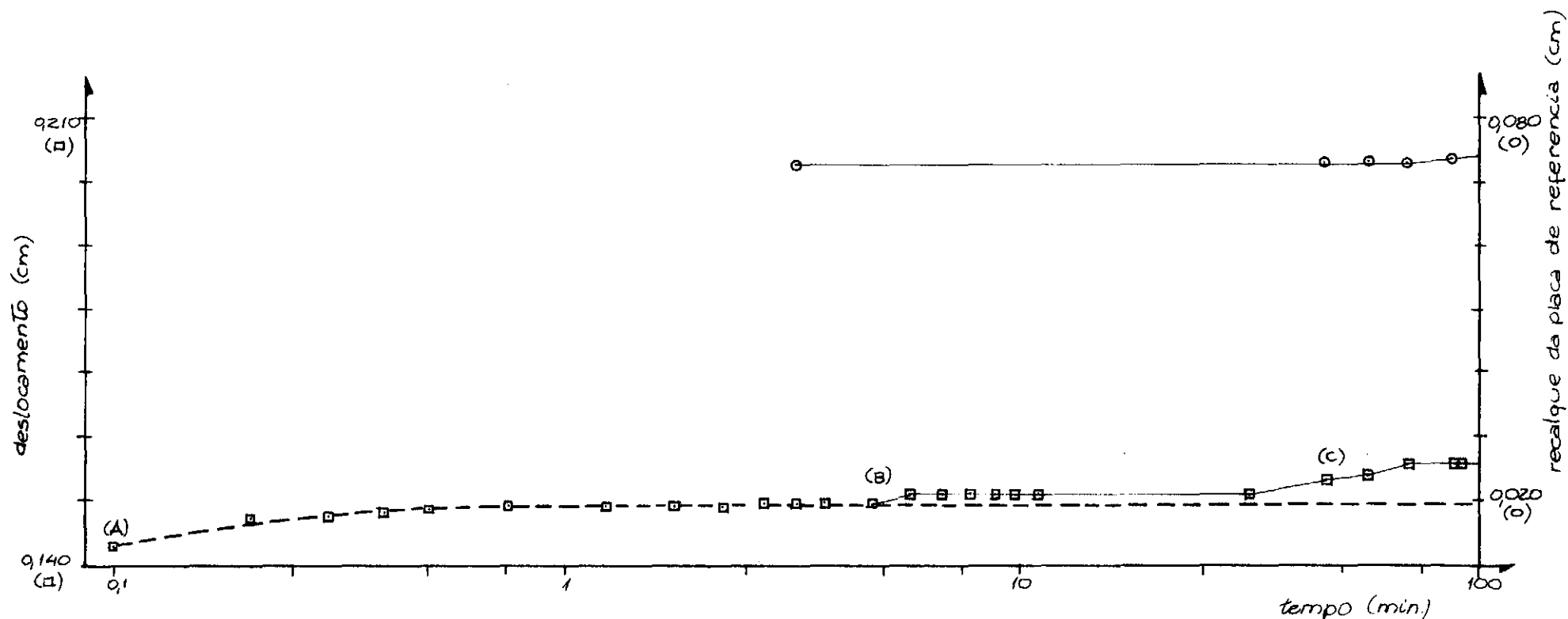
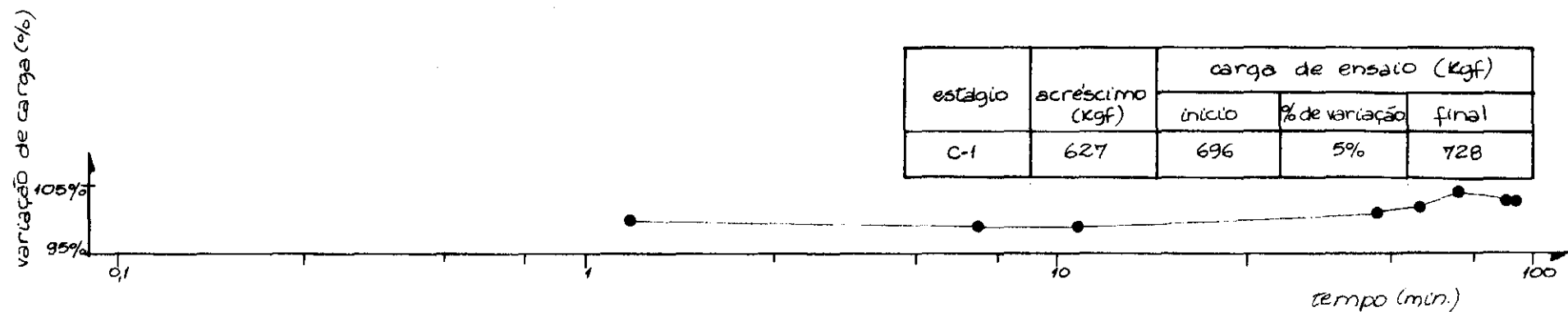


FIG. V.39 a TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO C — ESTÁGIO C-1).

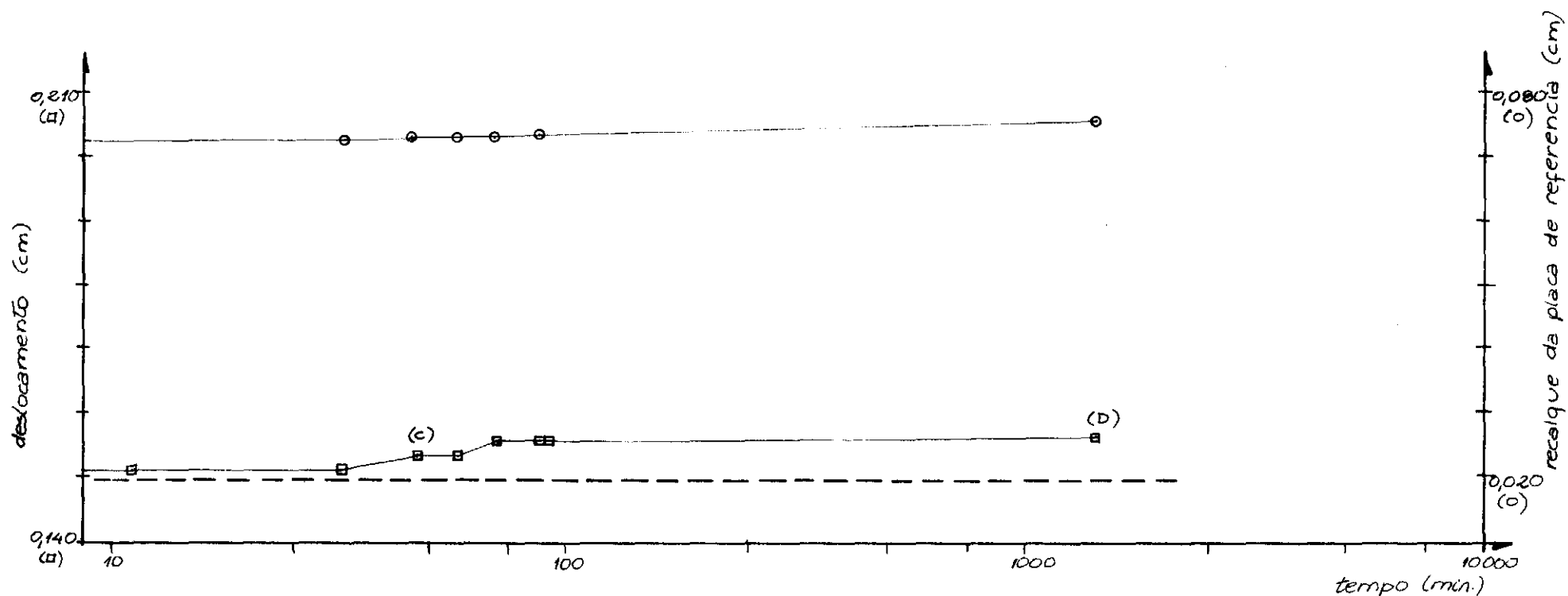
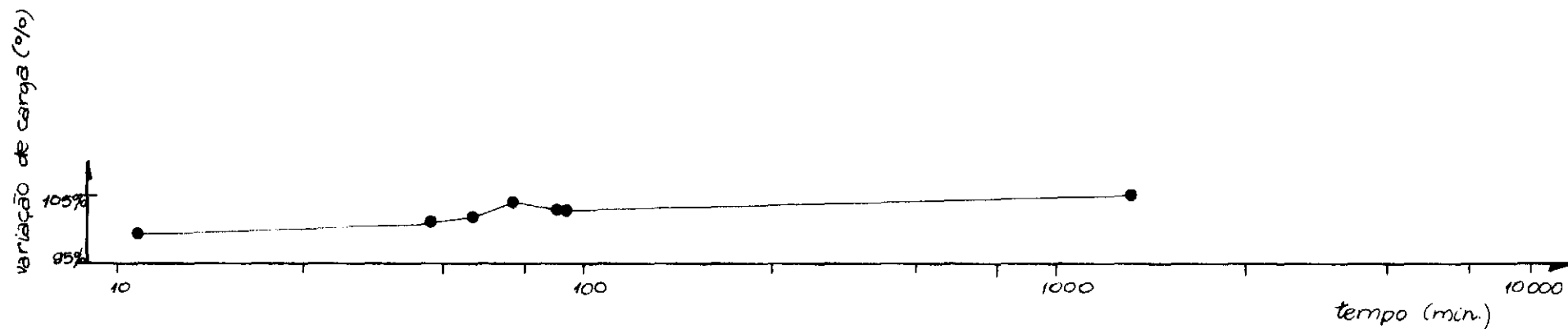


FIG. V.39 b TIRANTE 5-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO C - ESTÁGIO C-1, CONTINUAÇÃO)

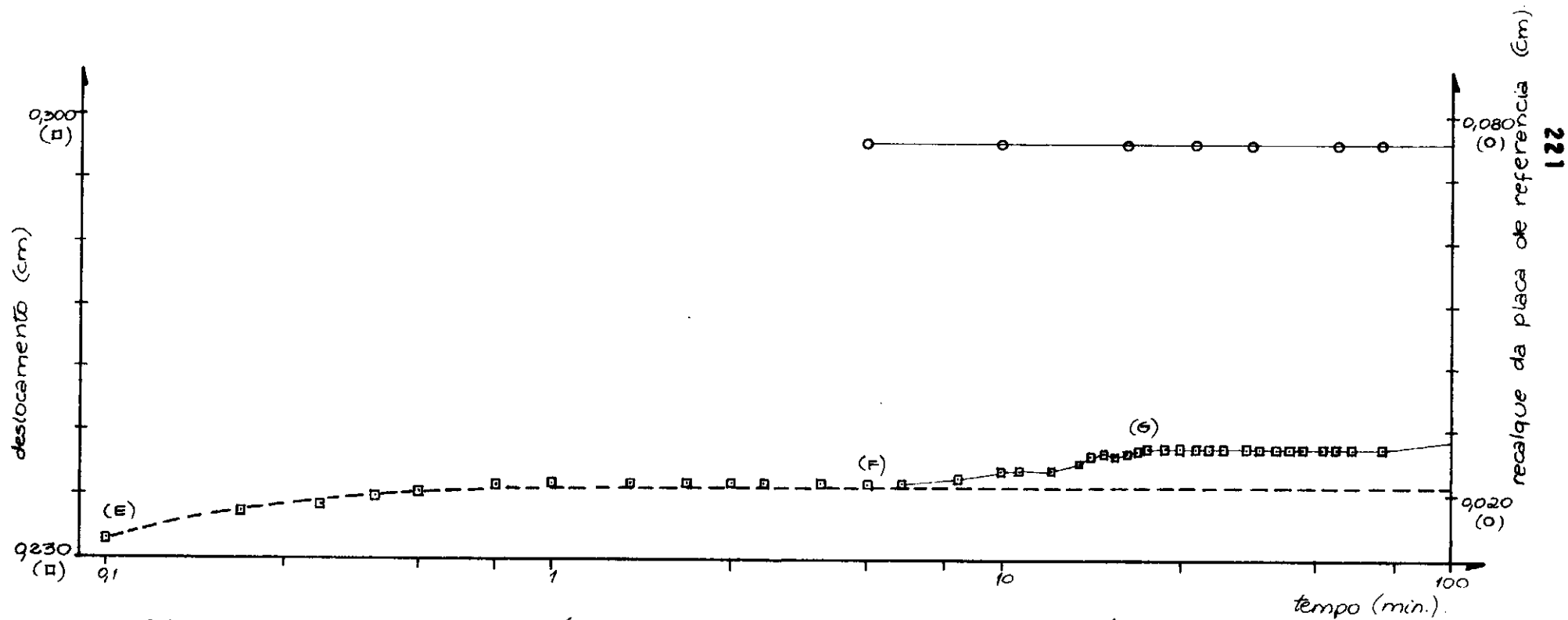
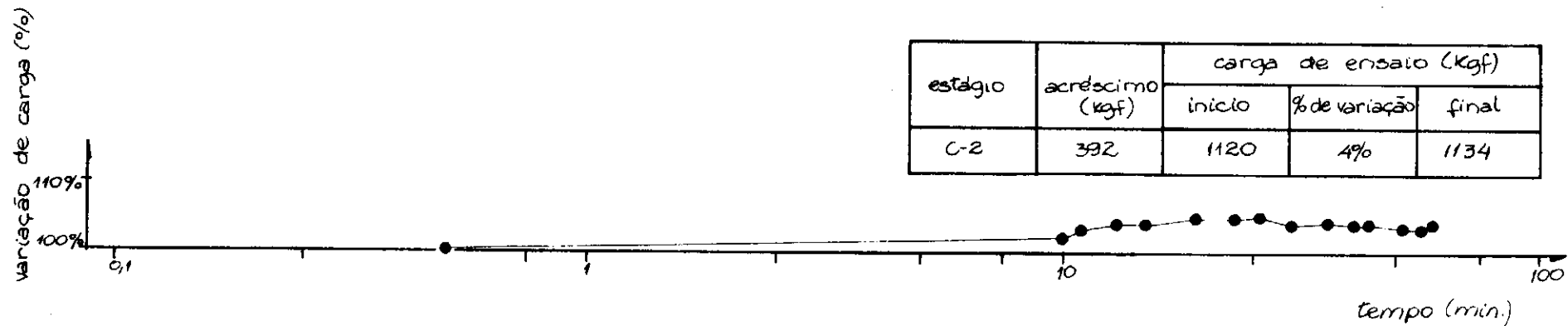


FIG. V.40 a TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO C — ESTÁGIO C-2).

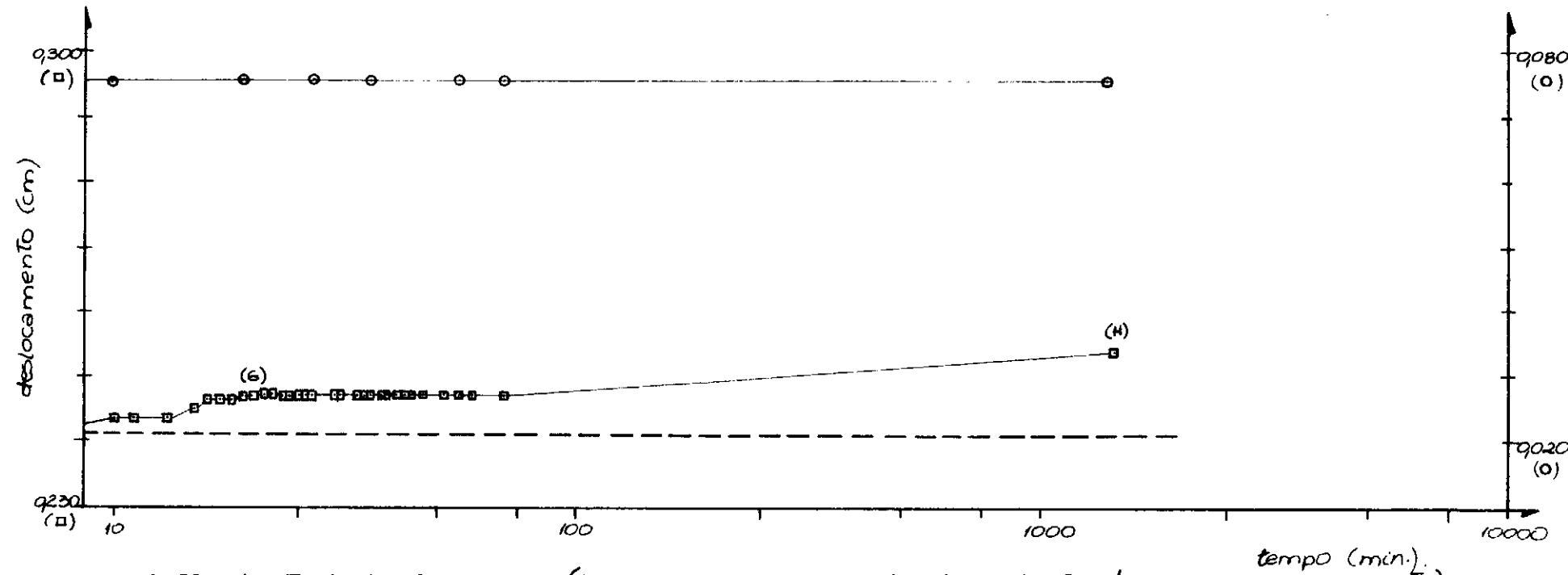
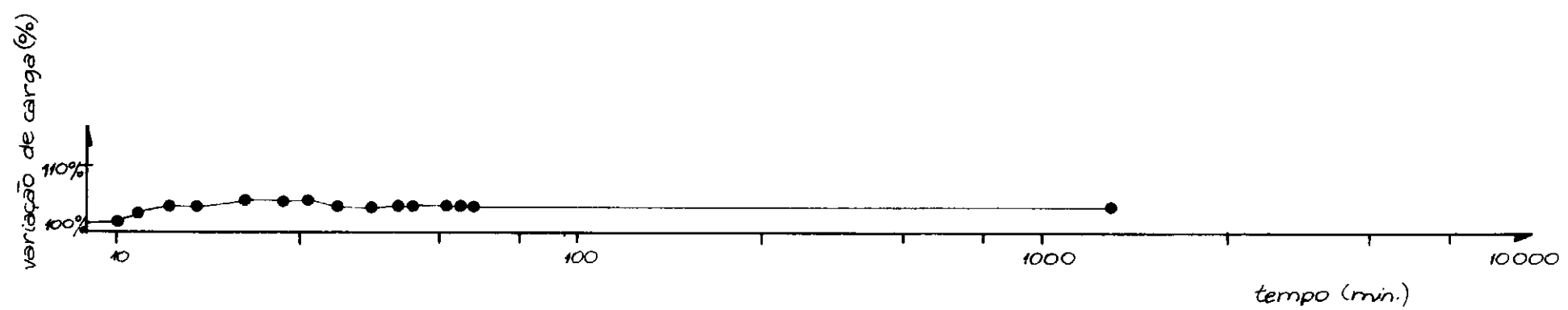


FIG. V.40b TIRANTE 3-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO C- ESTÁGIO C-2 ,CONTINUAÇÃO).

variação de carga (%)

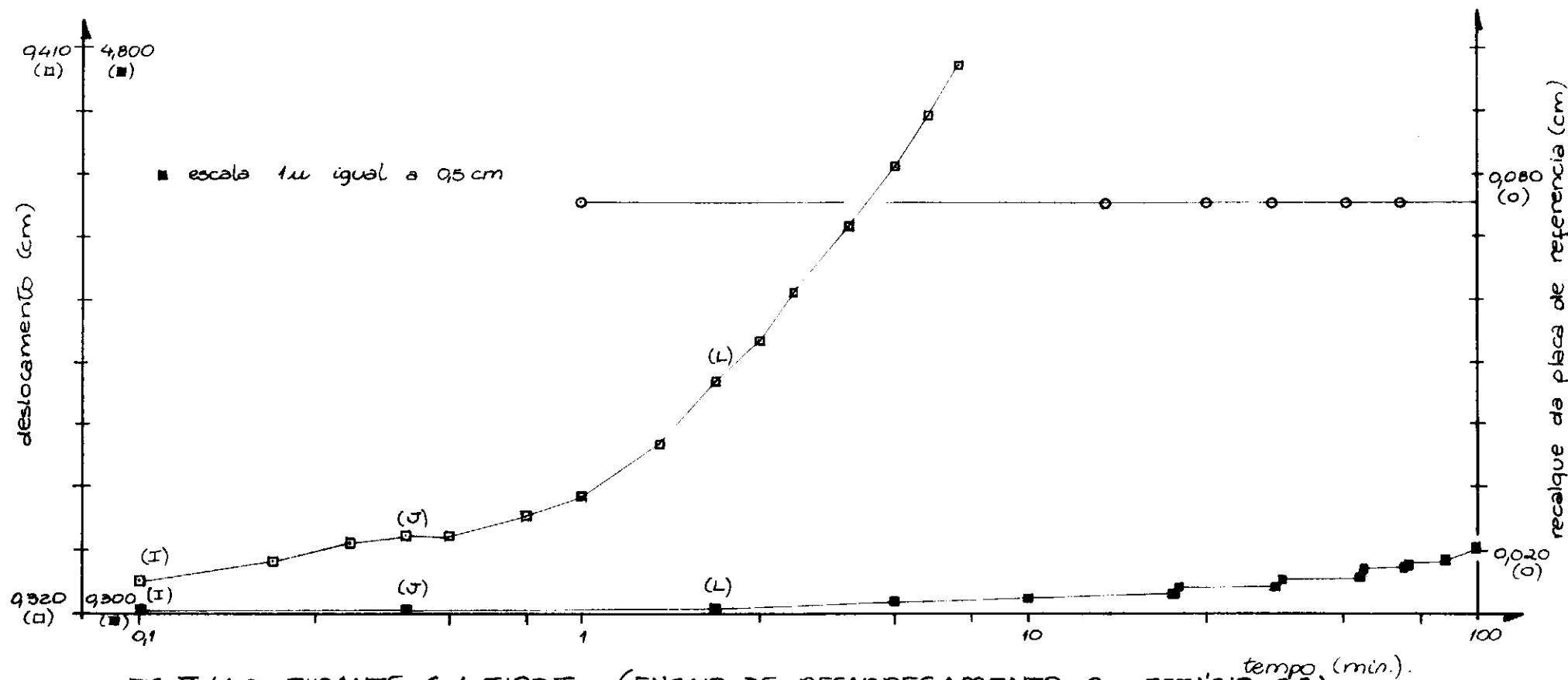
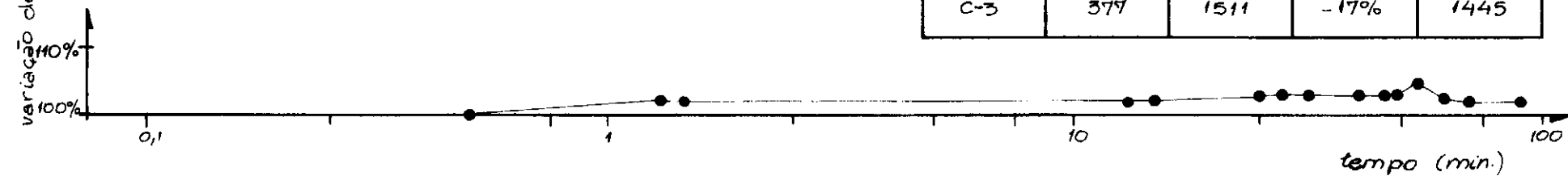


FIG. V 41 a TIRANTE 3-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO C - ESTÁGIO C-3)

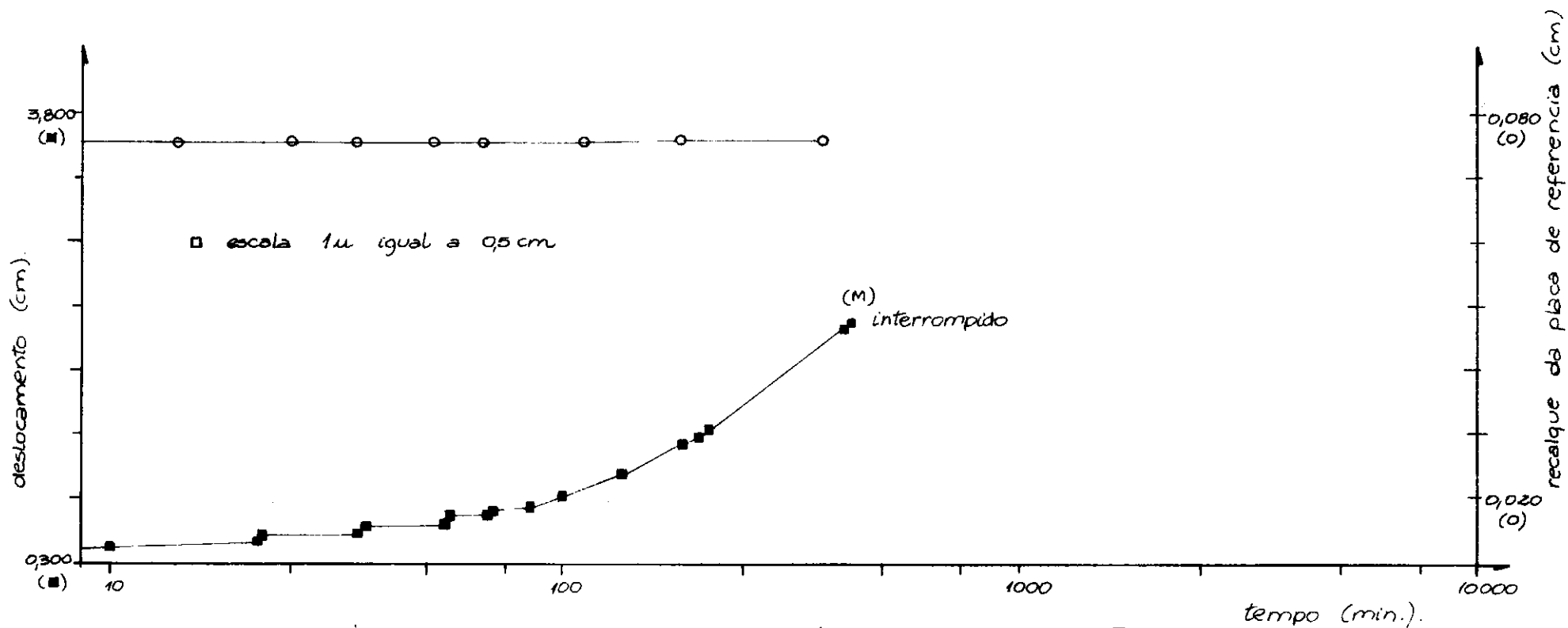
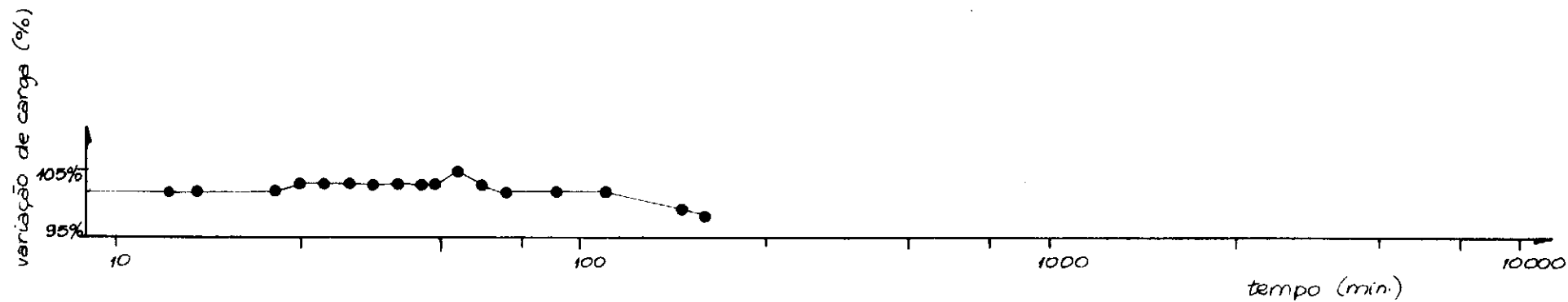


FIG. T.41 b (ENSAIO DE RECARREGAMENTO C - ESTÁGIO C-3 , CONTINUAÇÃO)

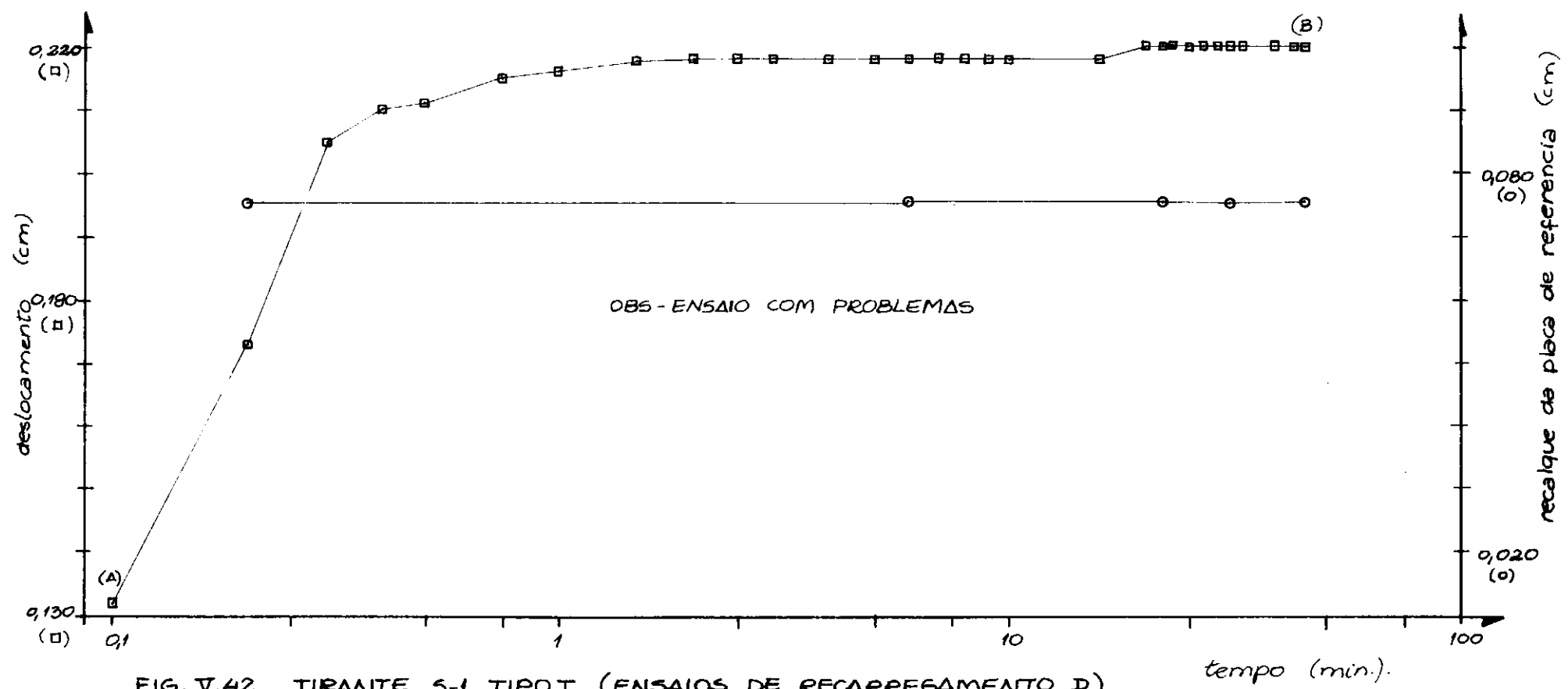
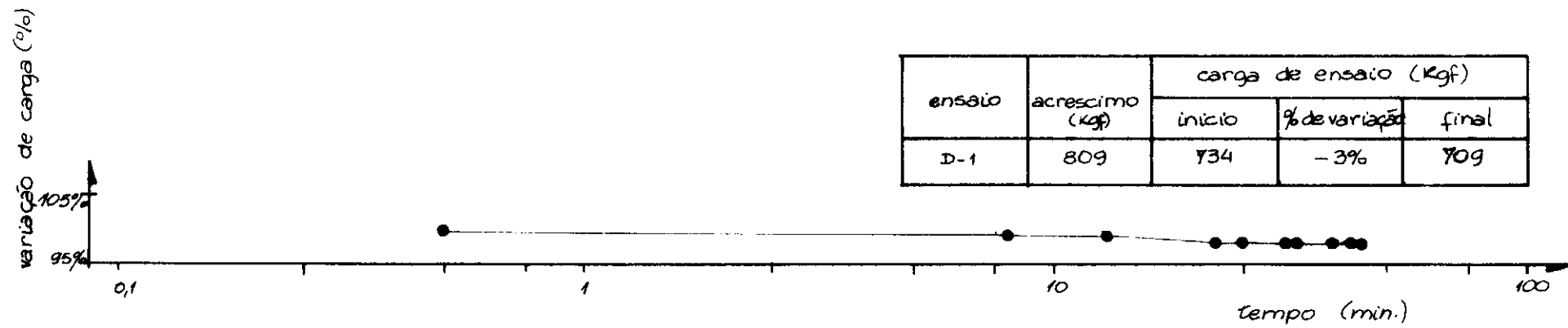


FIG. V.42 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO D)



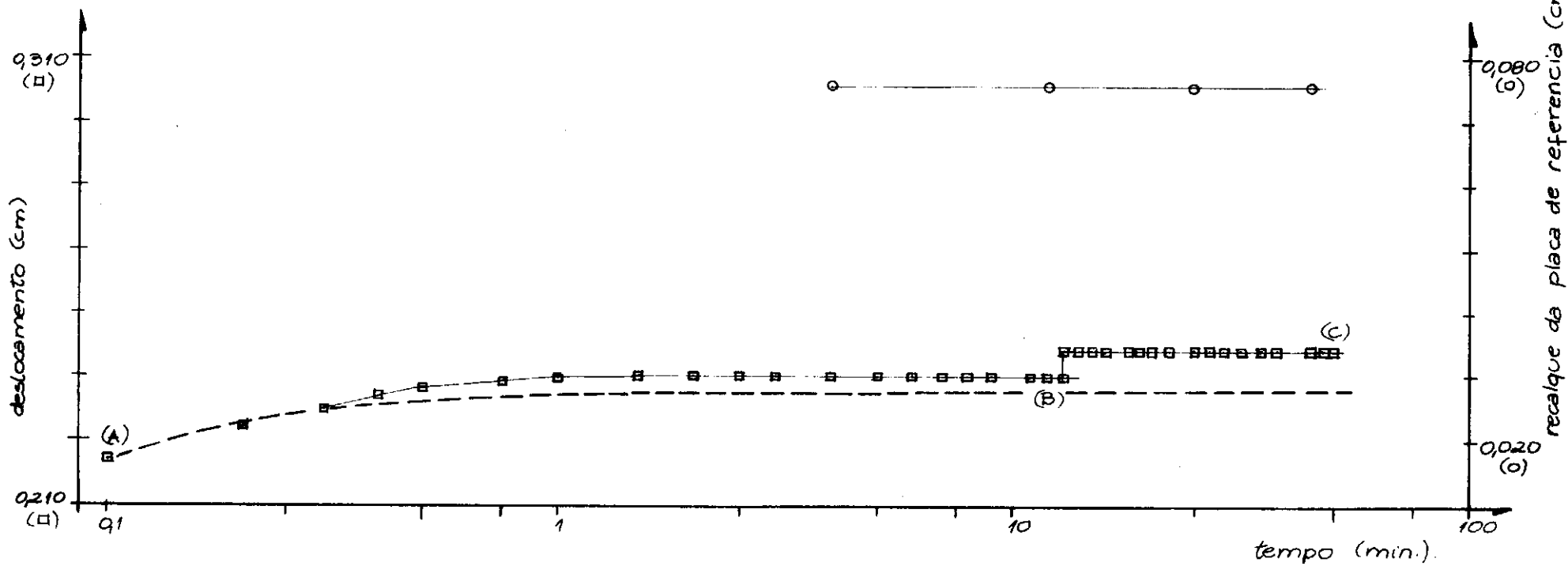
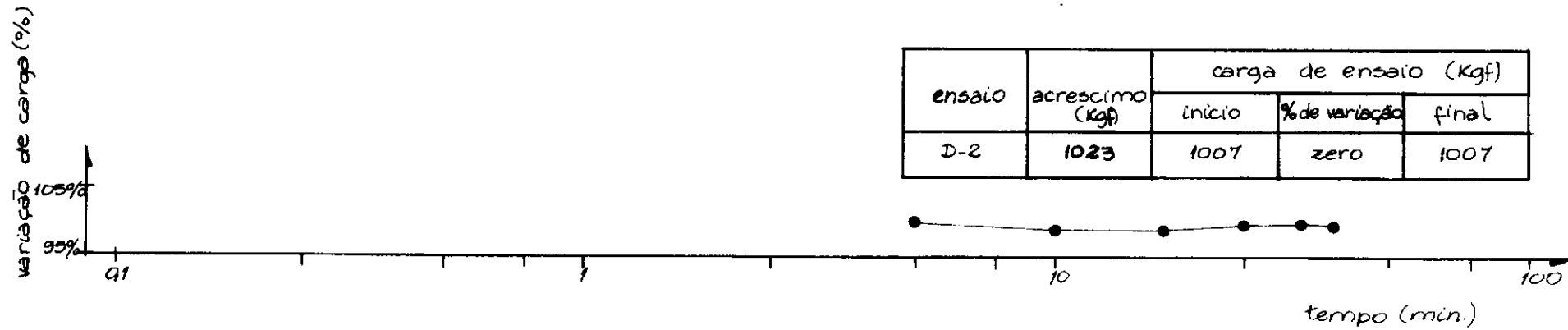
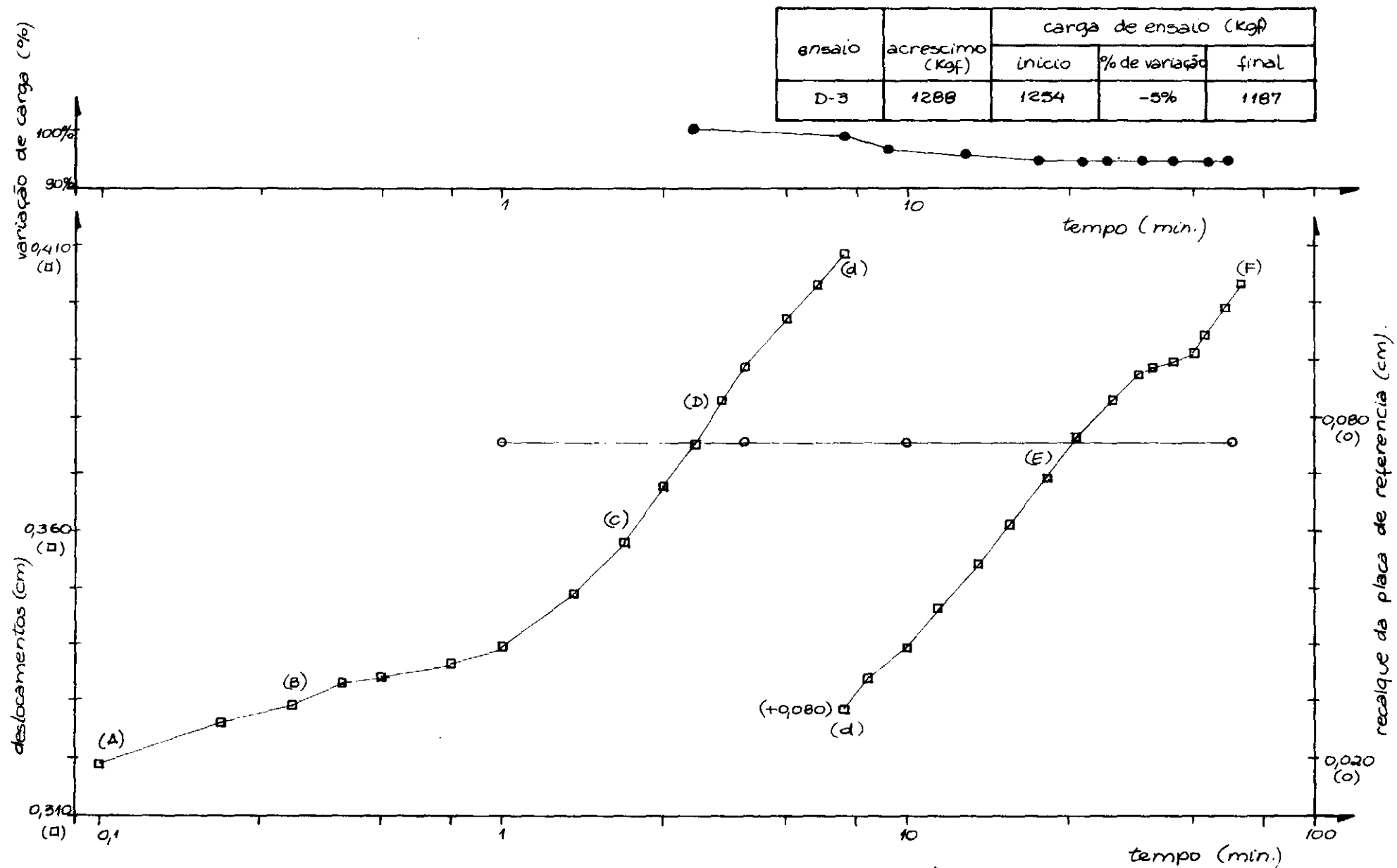


FIG. V.43 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO D)



| ensaio | acrescimo (kgf) | carga de ensaio (kgf) |               |       |
|--------|-----------------|-----------------------|---------------|-------|
|        |                 | início                | % de variação | final |
| D-3    | 1288            | 1254                  | -5%           | 1187  |

FIG. V.44 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO D)

(cm) deslocamento da placa de referência

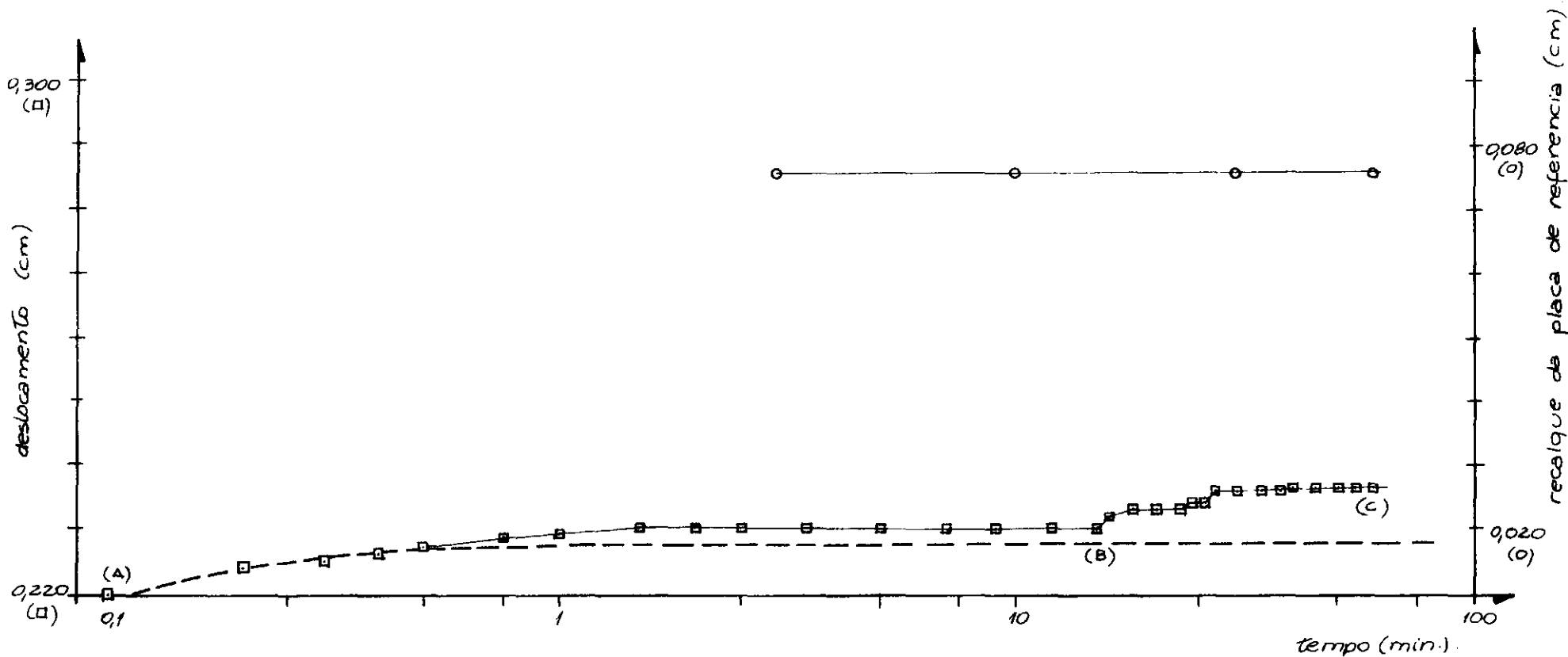
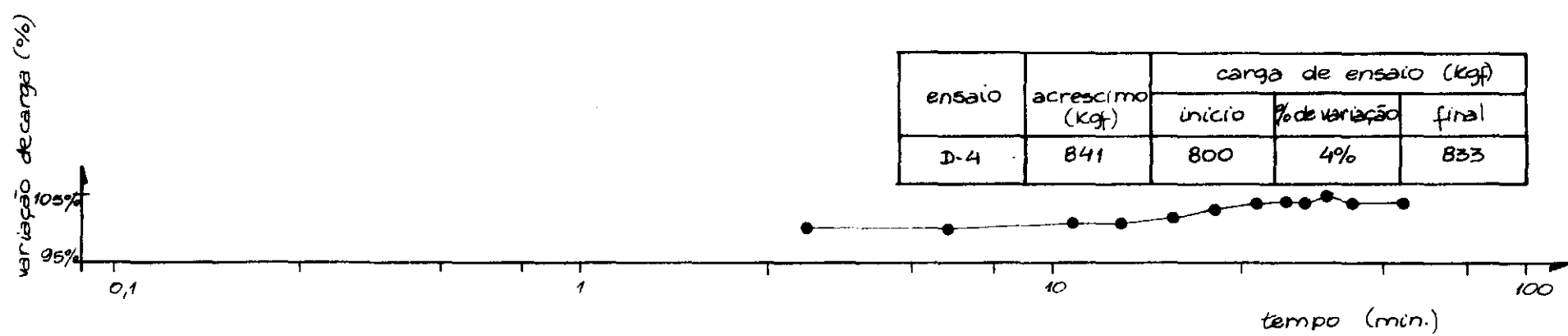
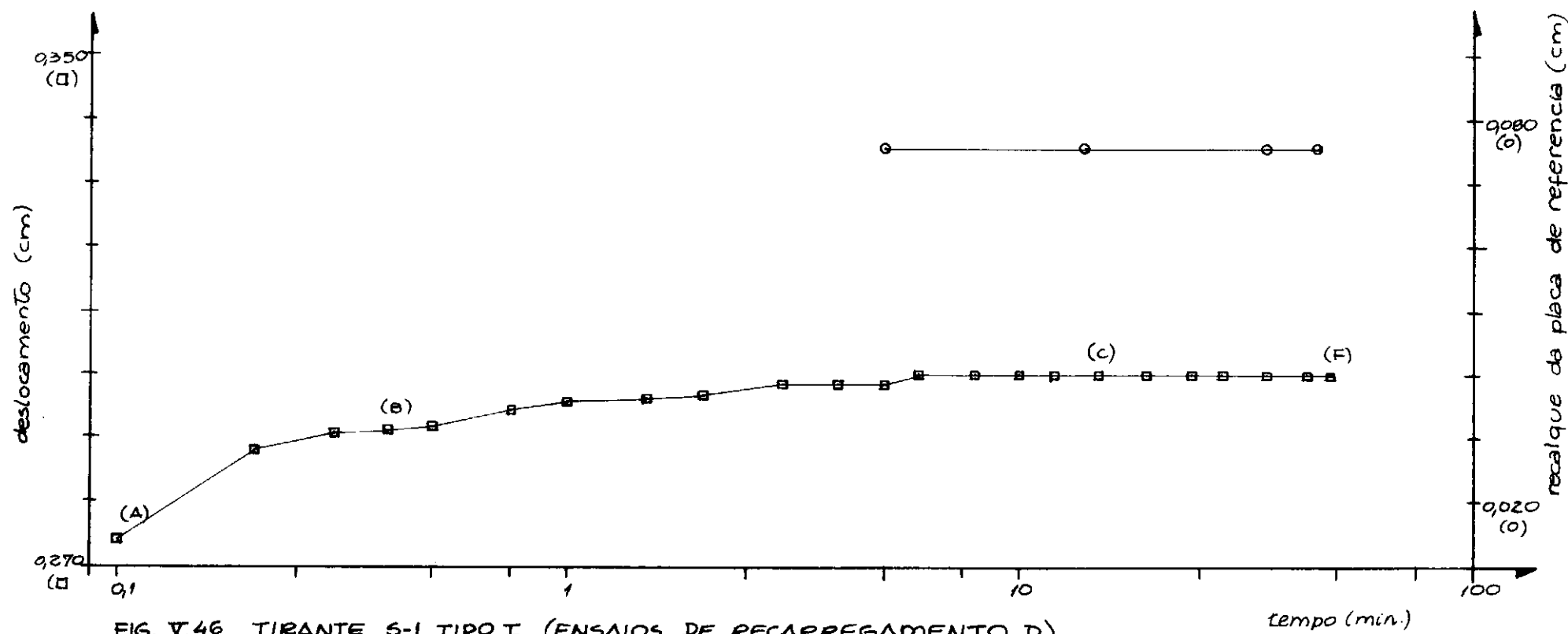
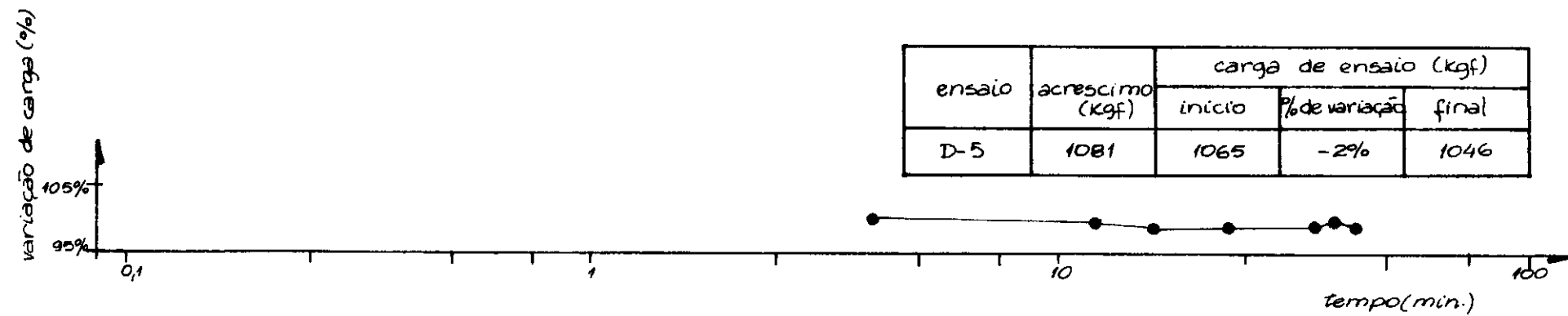


FIG. V.45 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO D)



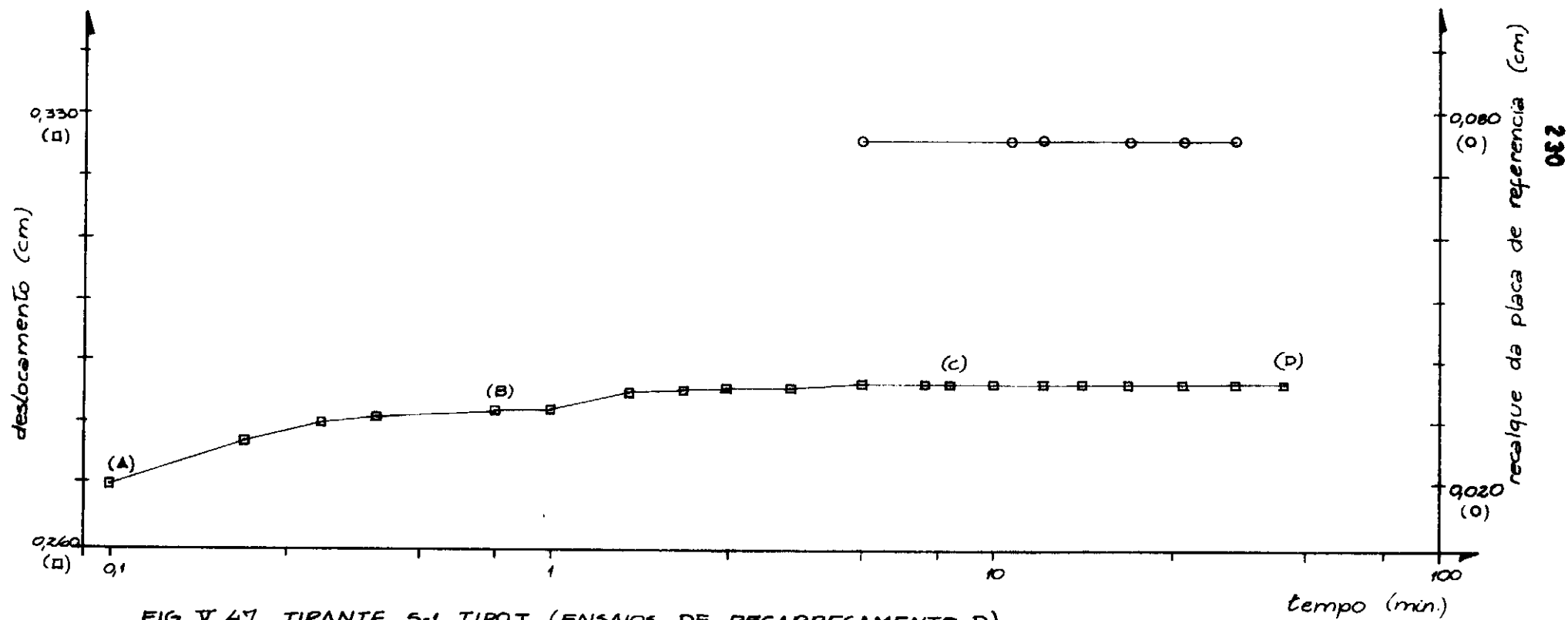
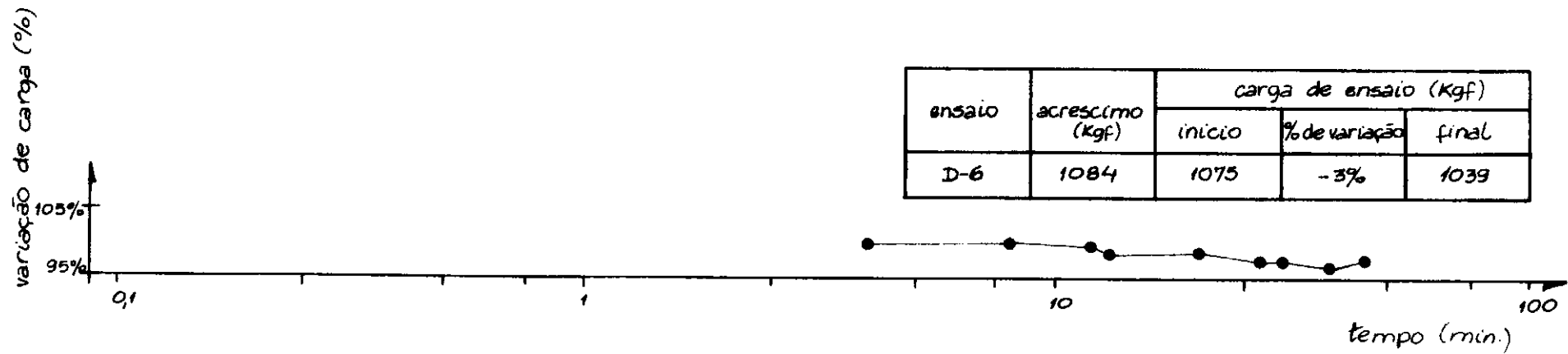


FIG. V. 47 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO D)

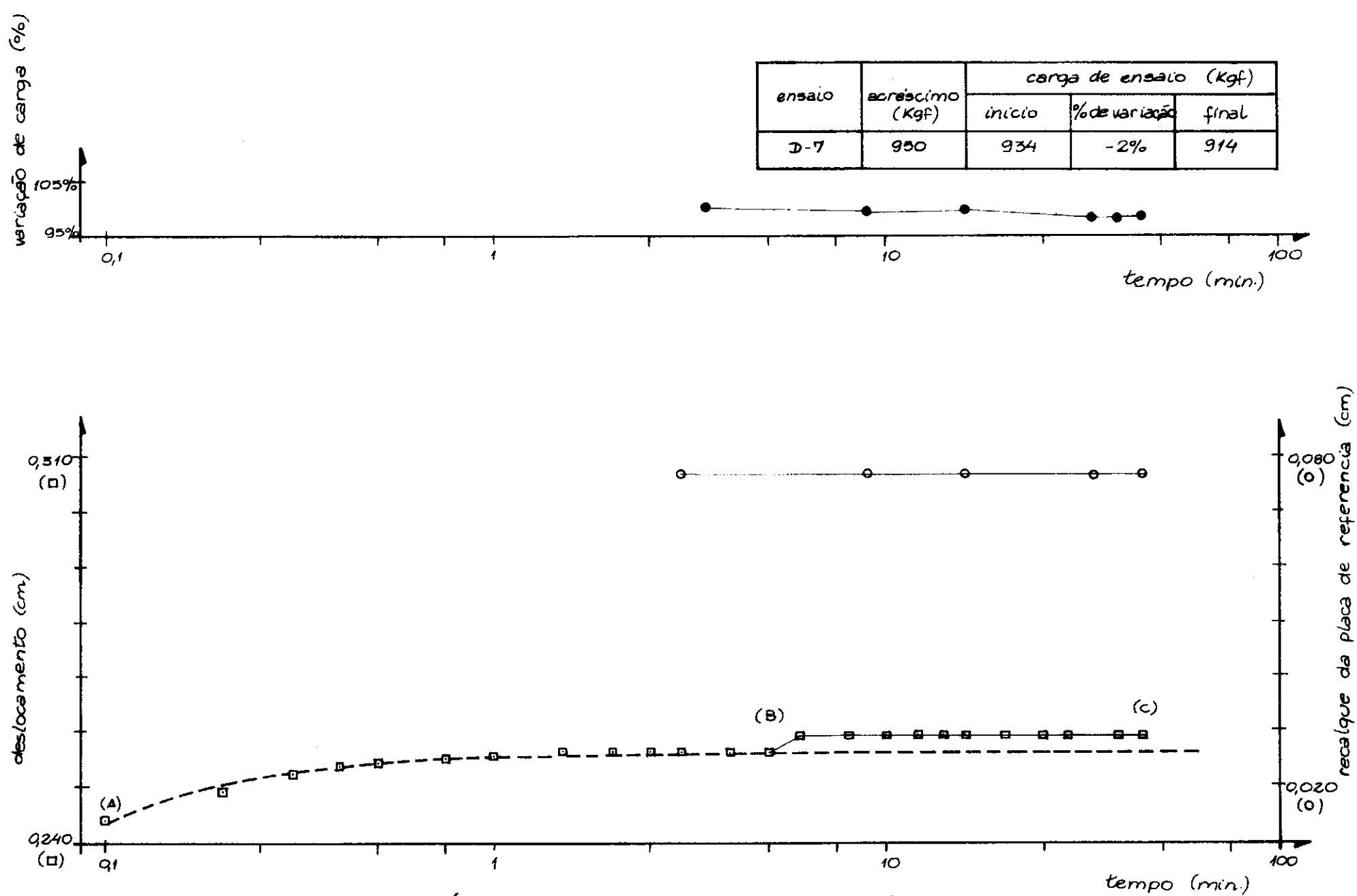


FIG. V.48 TIRANTE S-1 TIPO-I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO D)

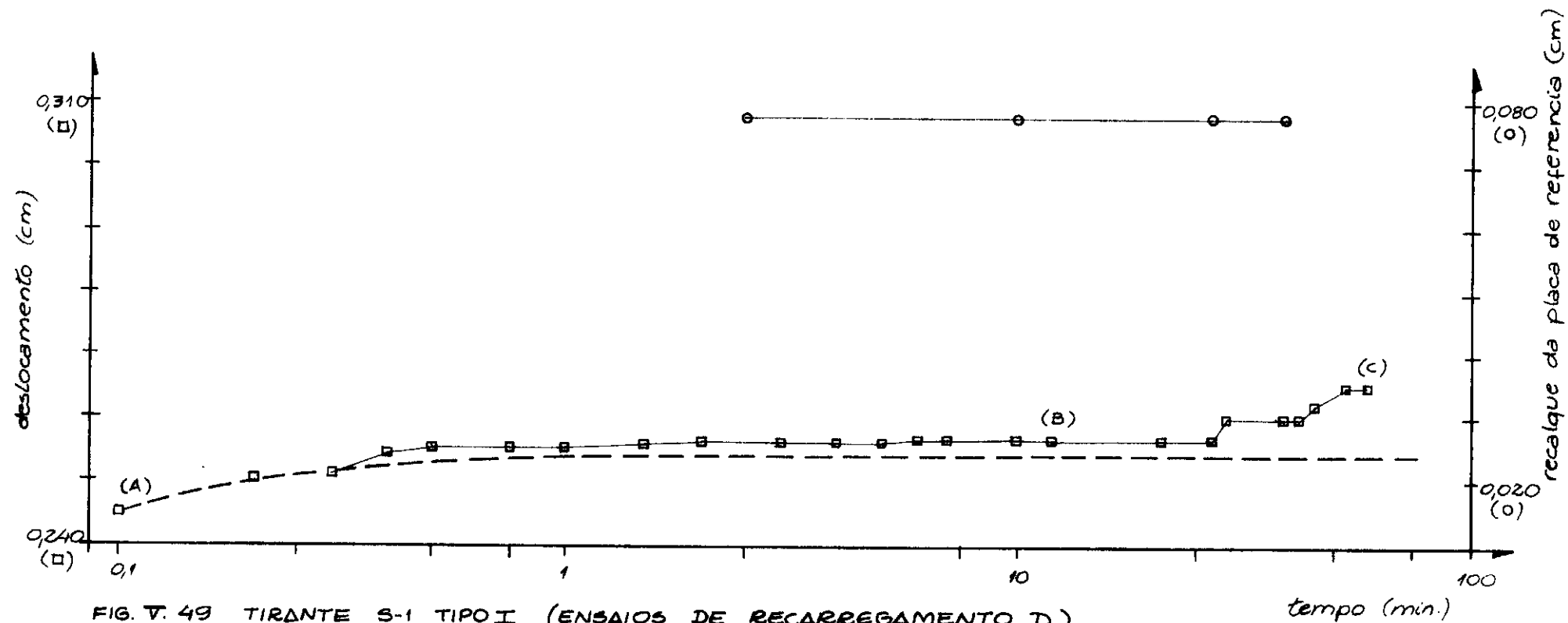
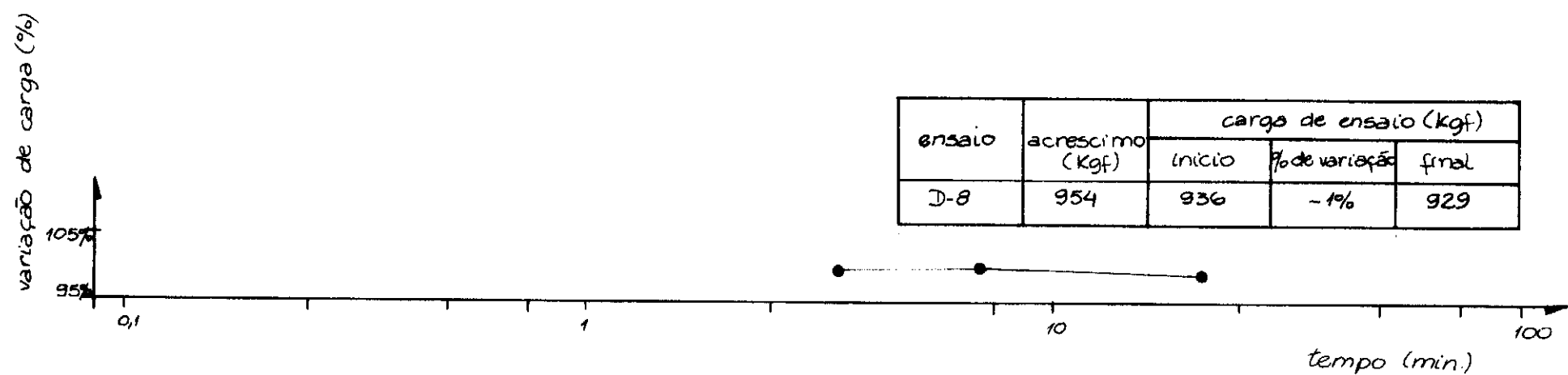


FIG. V. 49 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO D)

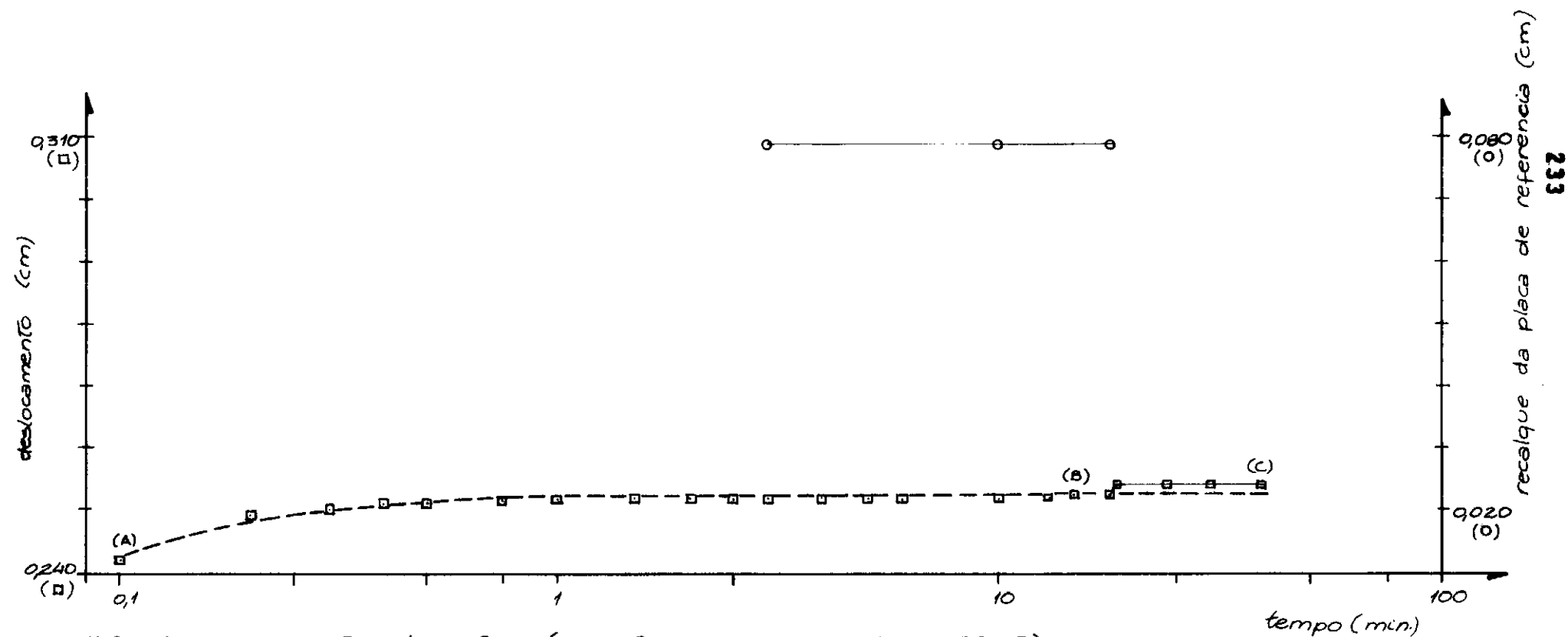
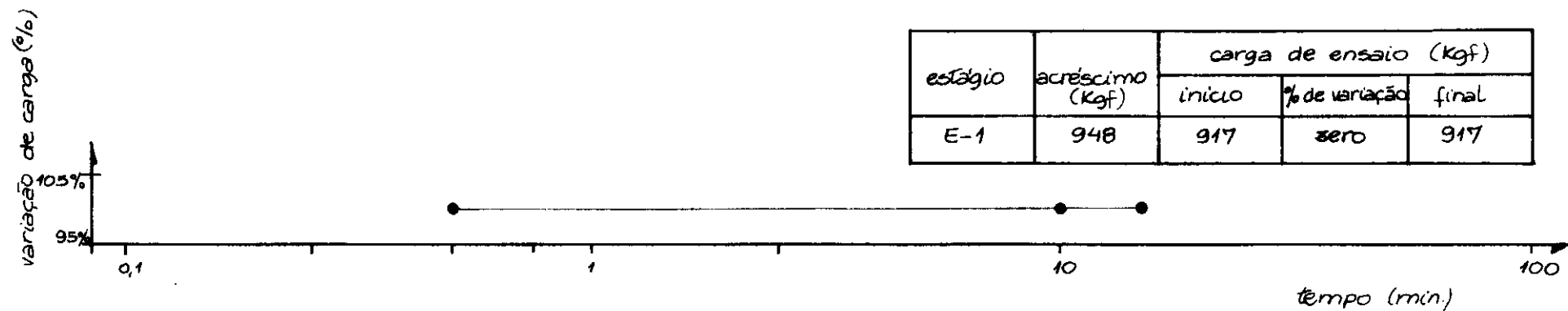


FIG. V.50 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO E)



| estágio        | acrescimento<br>(kgf) | carga de ensaio (kgf) |               |       |
|----------------|-----------------------|-----------------------|---------------|-------|
|                |                       | início                | % de variação | final |
| E-1 (□)        | 948                   | 917                   | zero          | 917   |
| E-2 (Δ)        | 296                   | 1213                  | zero          | 1213  |
| E-3 (○)<br>(●) | 268                   | 1481                  | zero          | 1481  |

(●) escala 1u igual a 0,1 cm

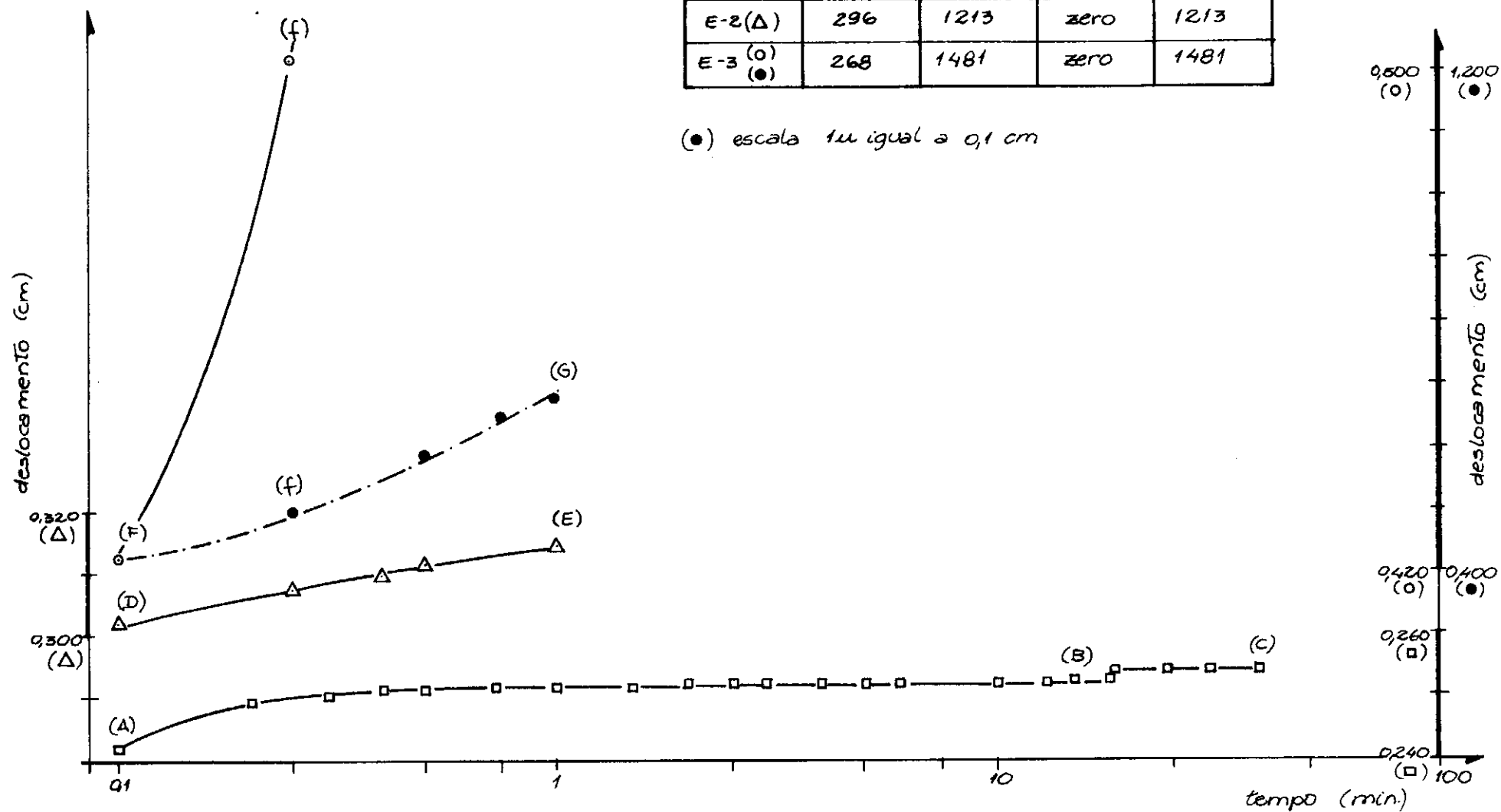


FIG.V.51 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO E)

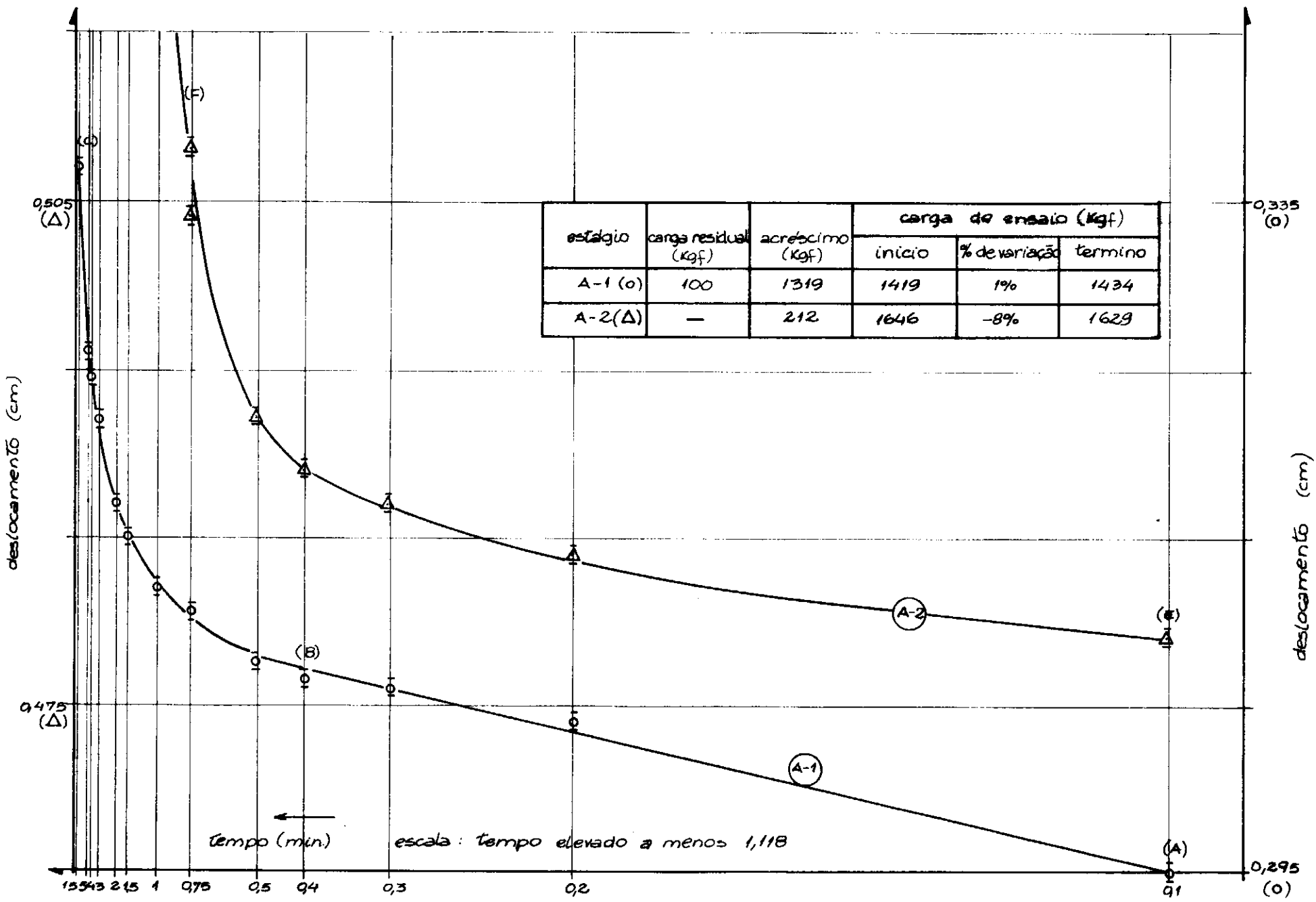


FIG. V.52 TIRANTE 6-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO A)



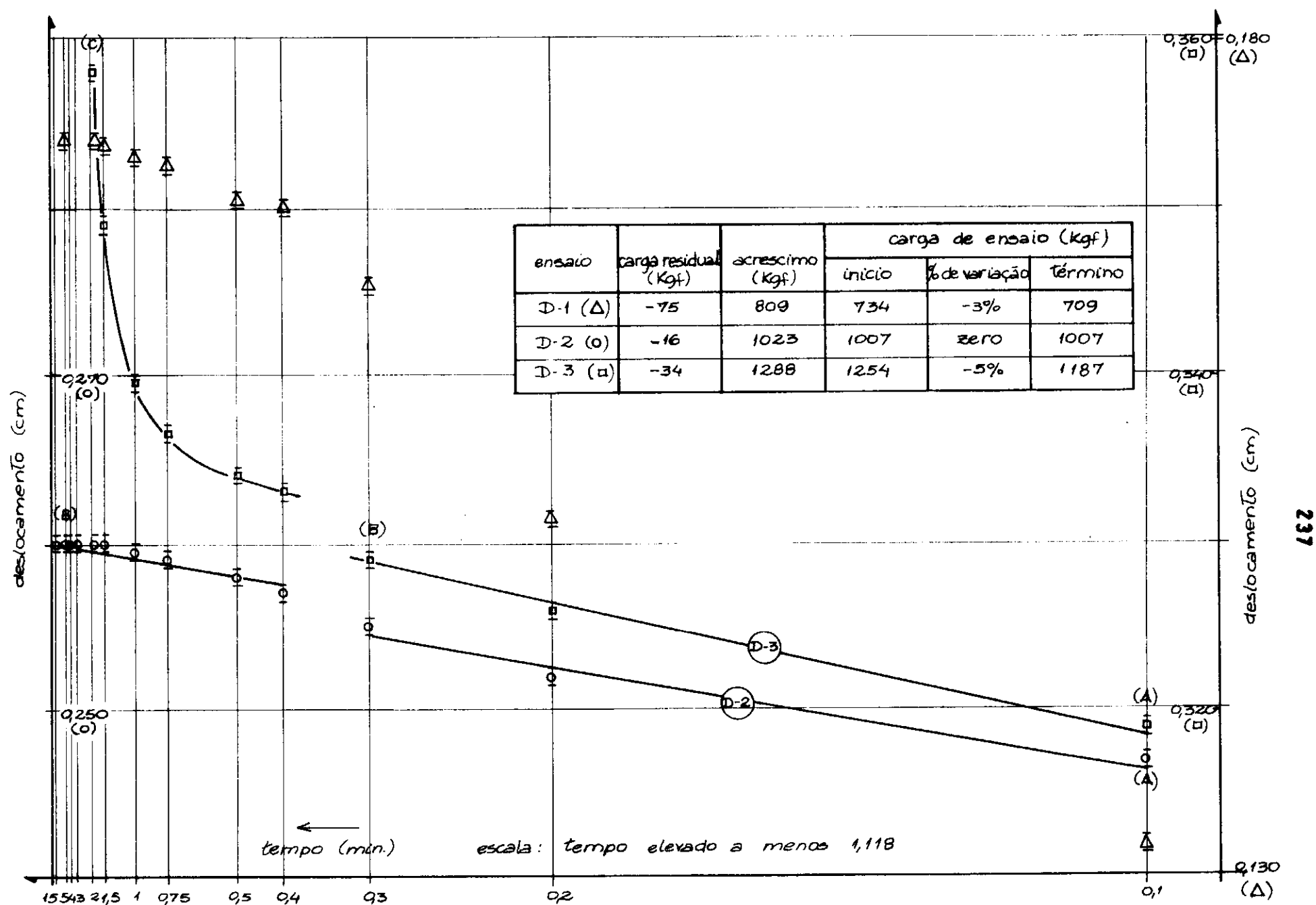


FIG. V.54 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO D)

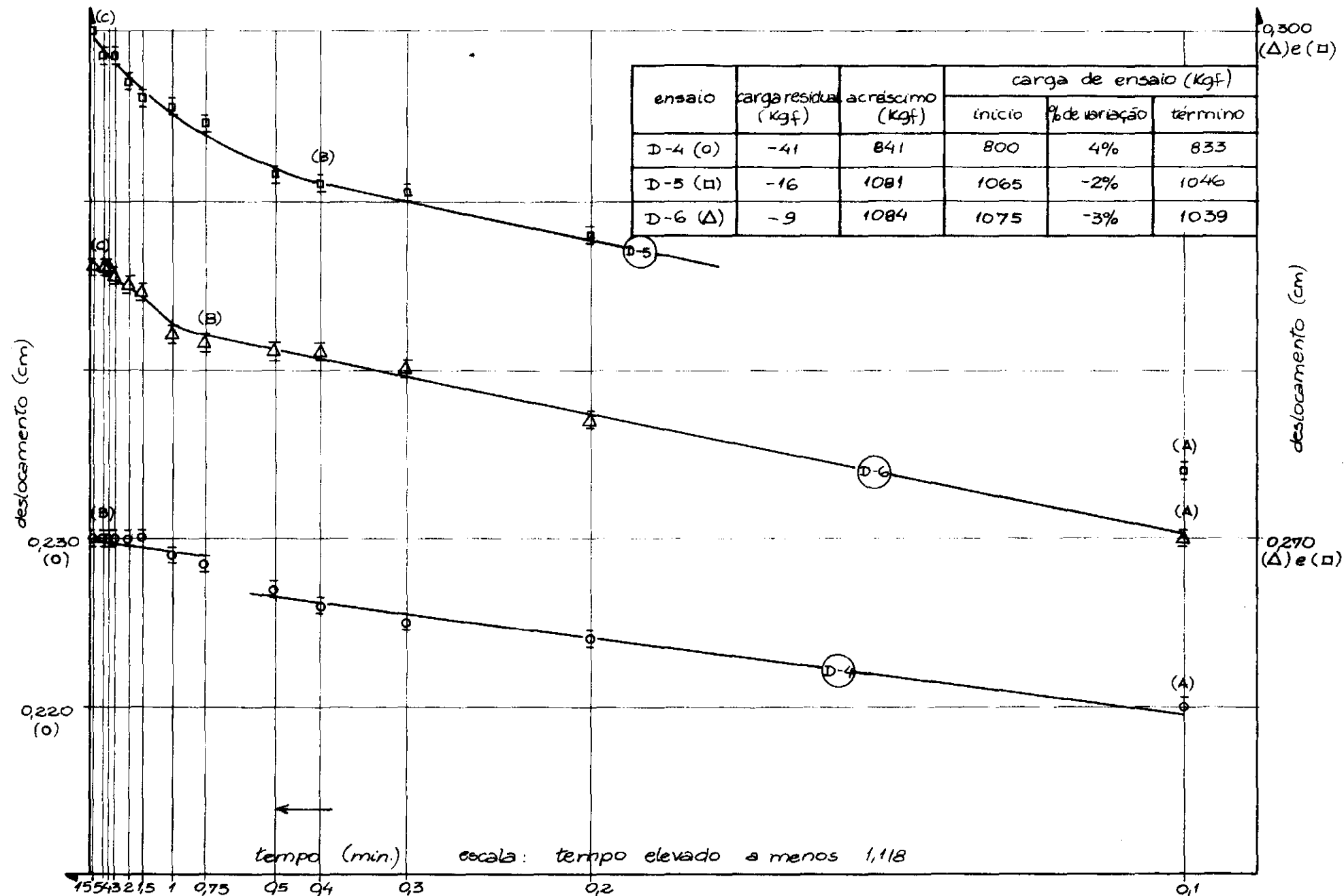


FIG. V.55 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO D)



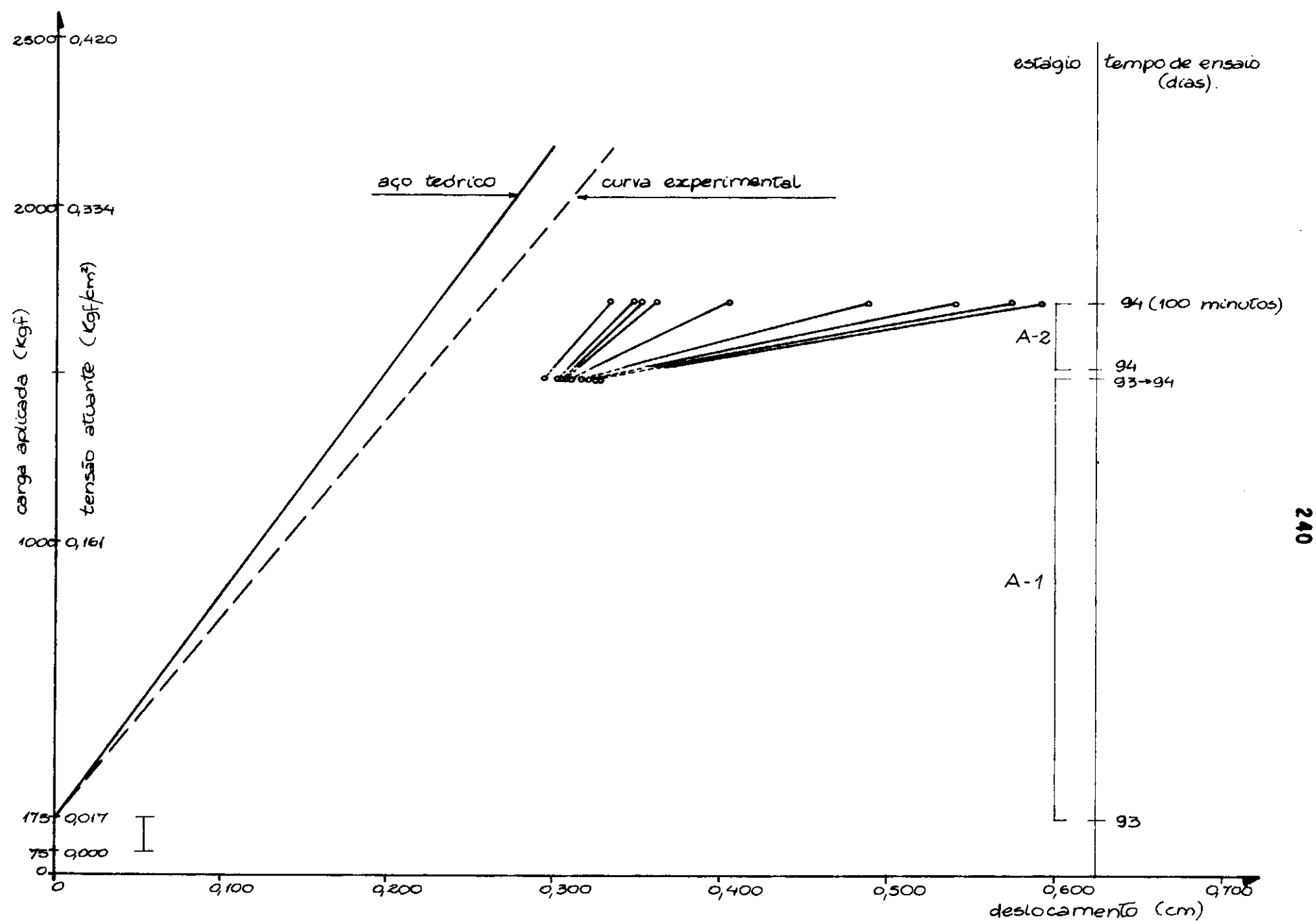


FIG. V. 37 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO A)

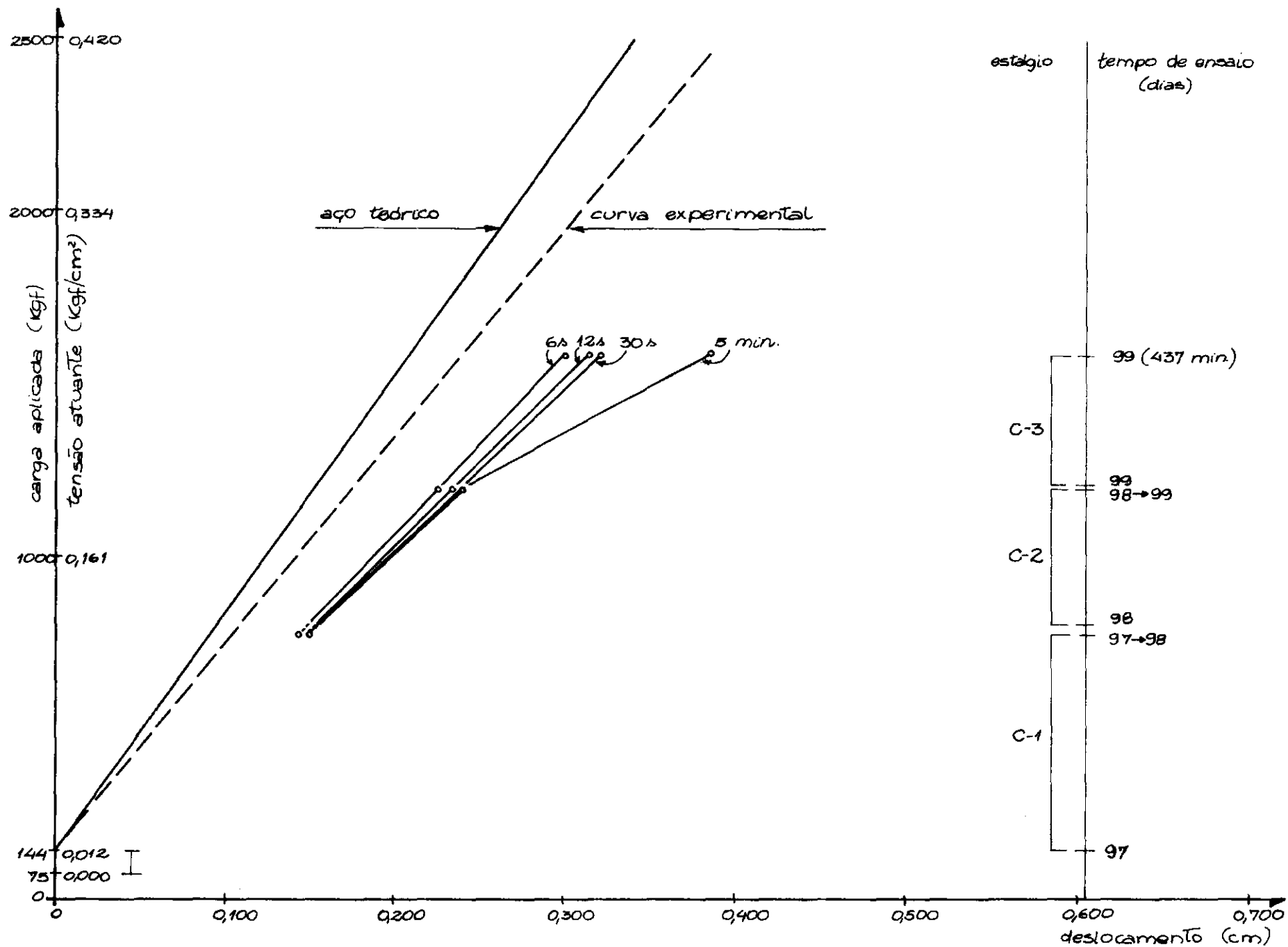


FIG. V.58 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO C)



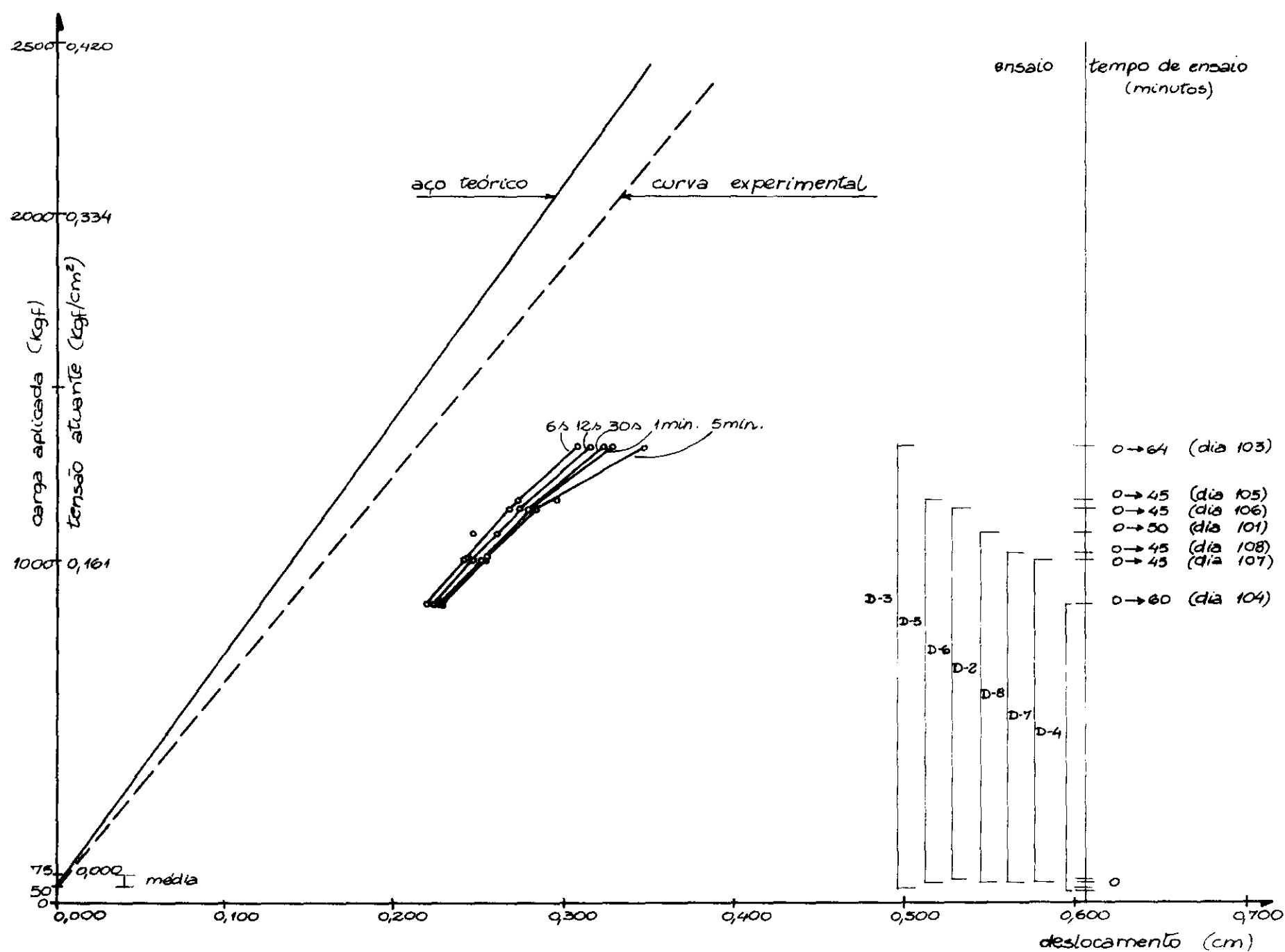


FIG. V. 59 TIRANTE 3-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTOS D).

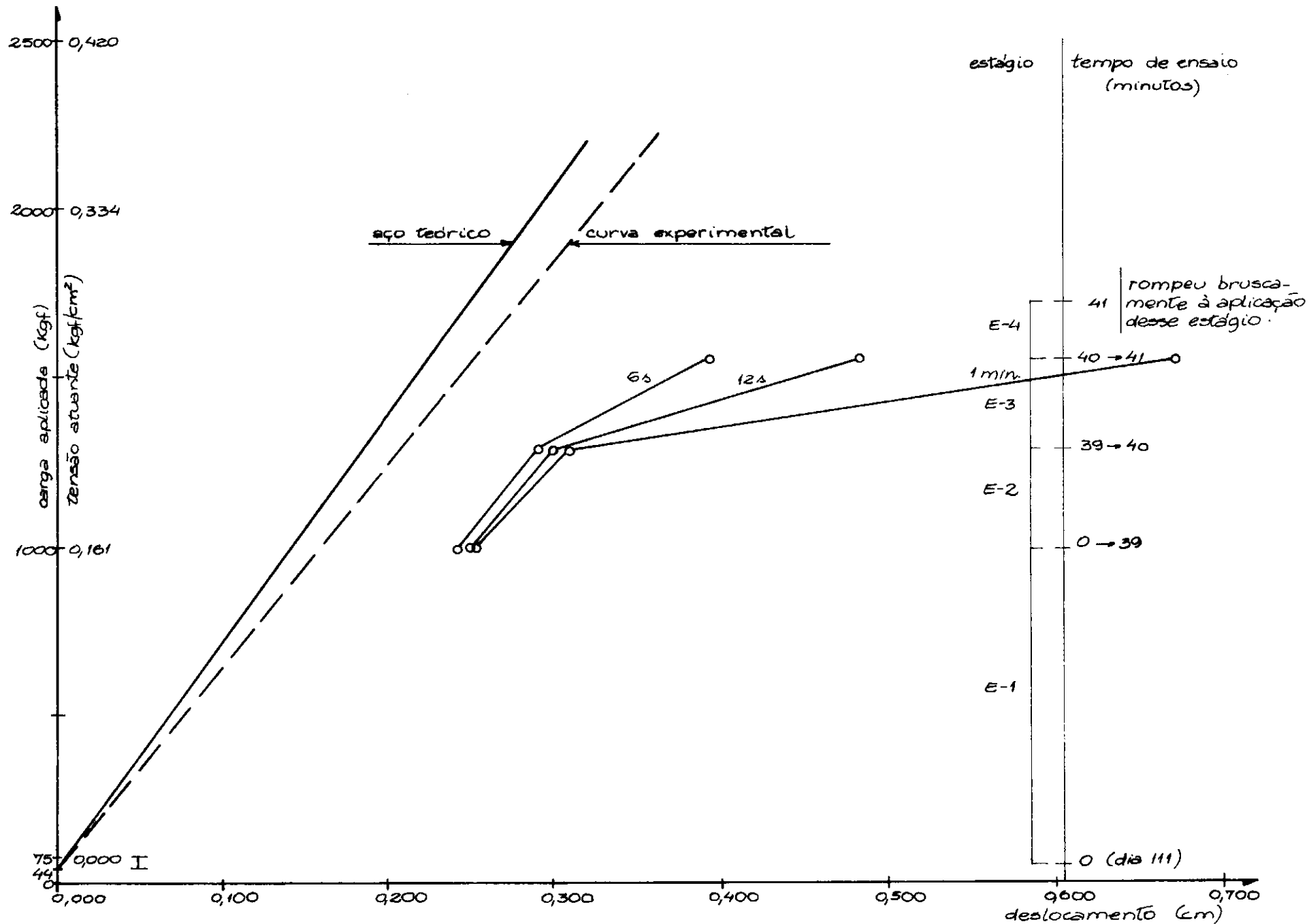


FIG. V.60 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO E)

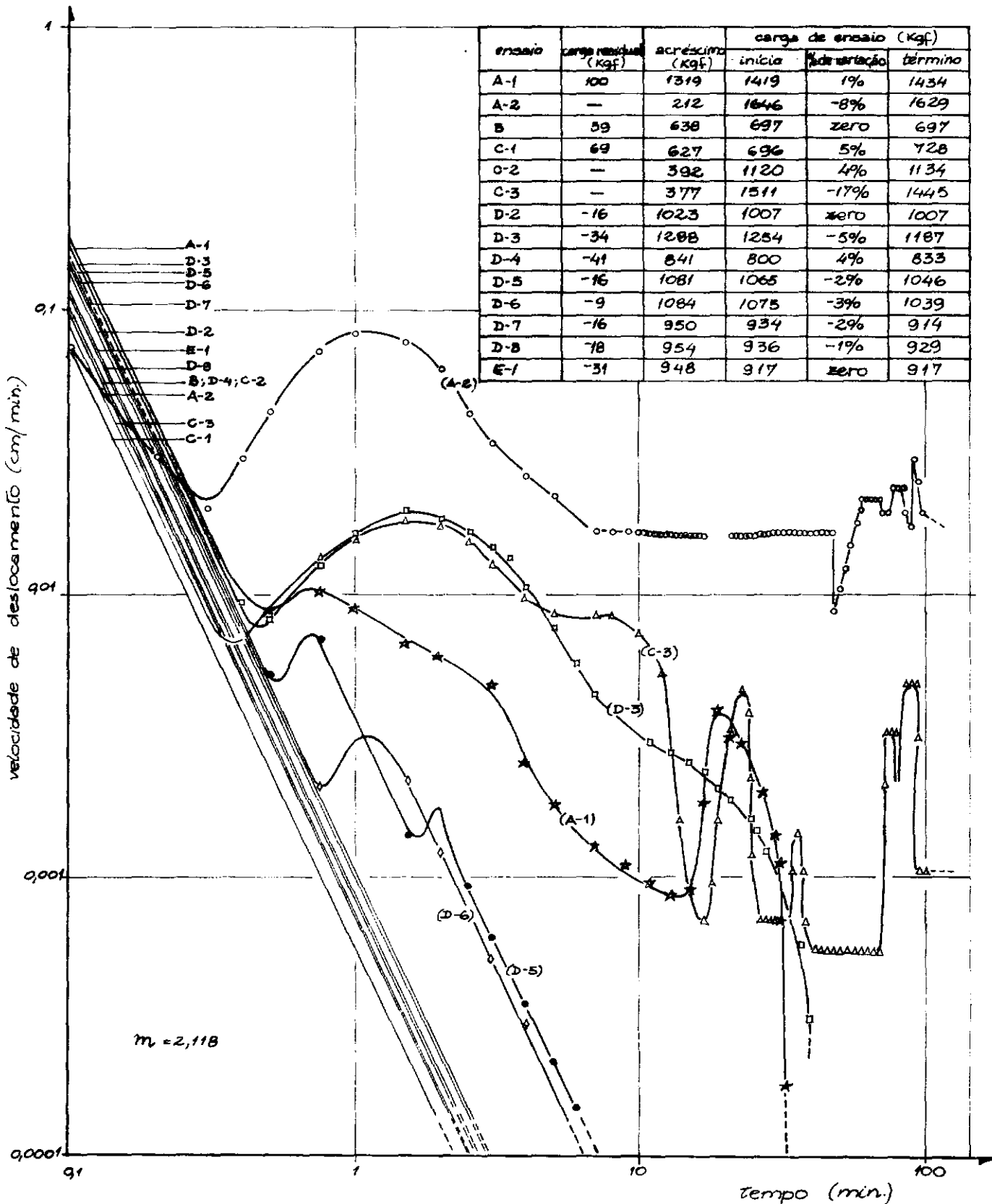


FIG. V.61 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO).

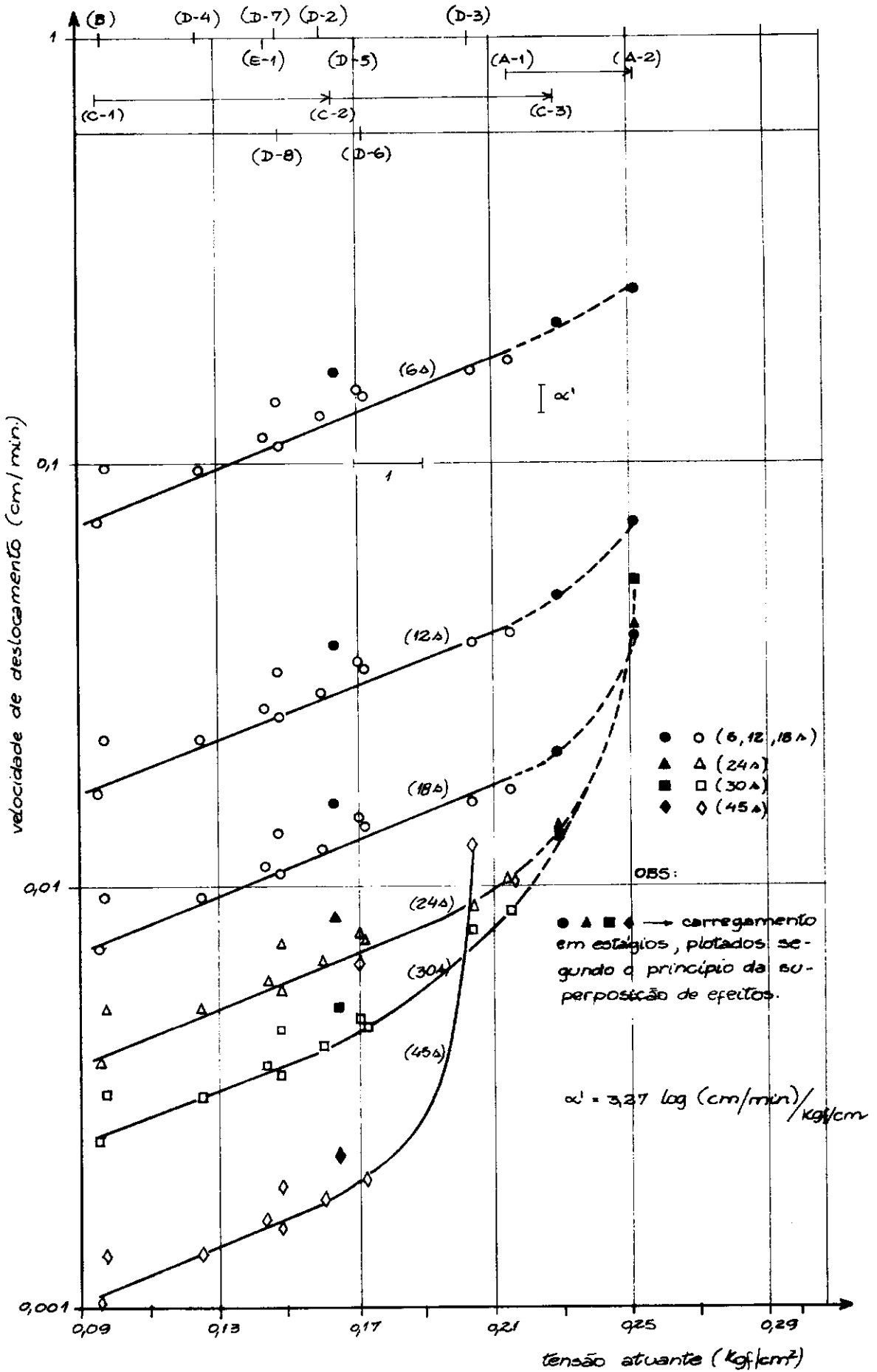


FIG. V.62 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE RECARGAMENTO)

| estágio        | acréscimo (Kgf) | carga de ensaio (Kgf) |
|----------------|-----------------|-----------------------|
| F-1 (○)        | 367             | 292                   |
| F-2 (□)        | 395             | 687                   |
| F-3 (Δ)        | 559             | 1246                  |
| F-4 (◇)<br>(◆) | 236             | 1482                  |

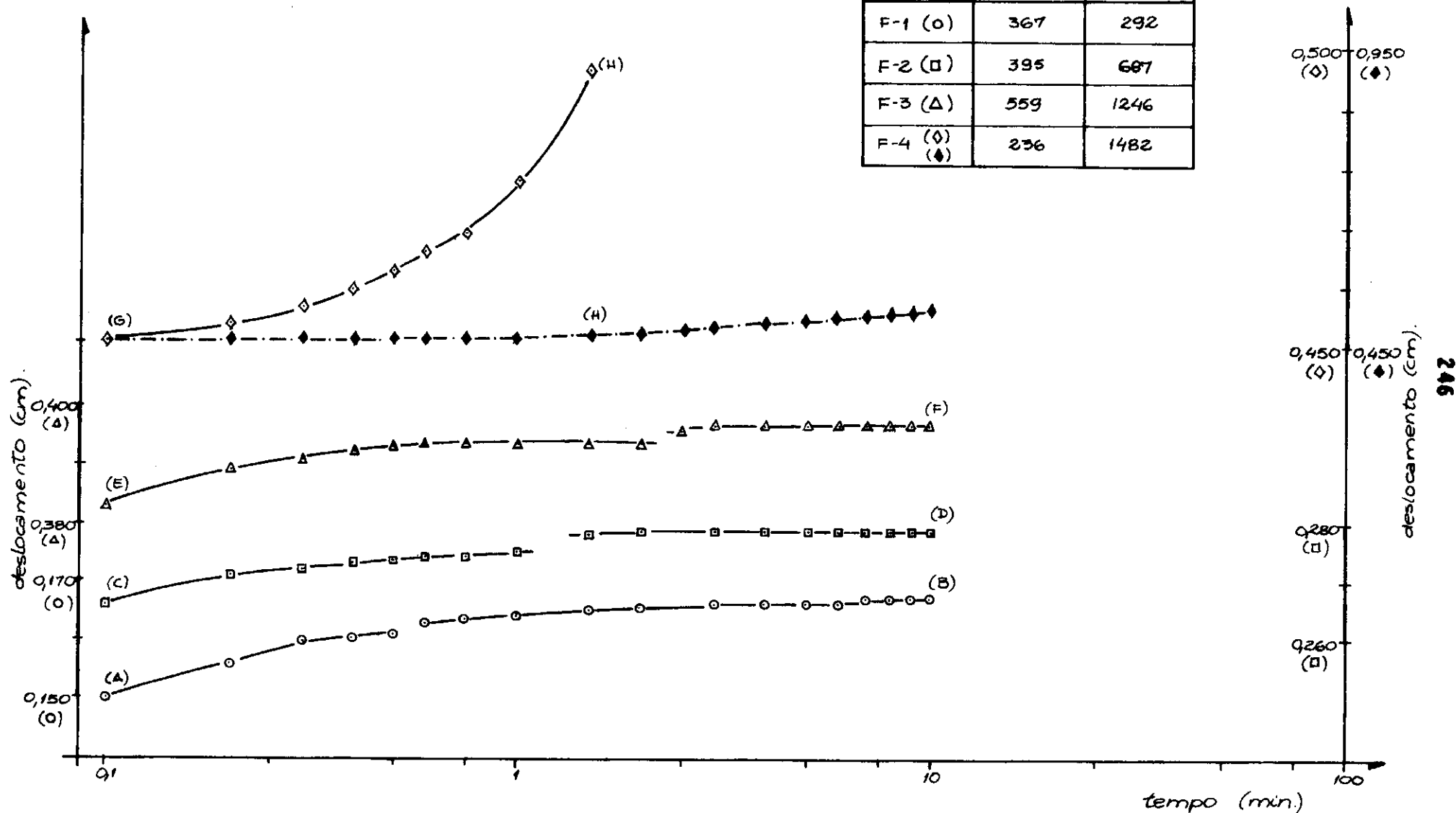


FIG. V. 63 a TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO F - ESTÁGIOS F-1, F-2, F-3, F-4)

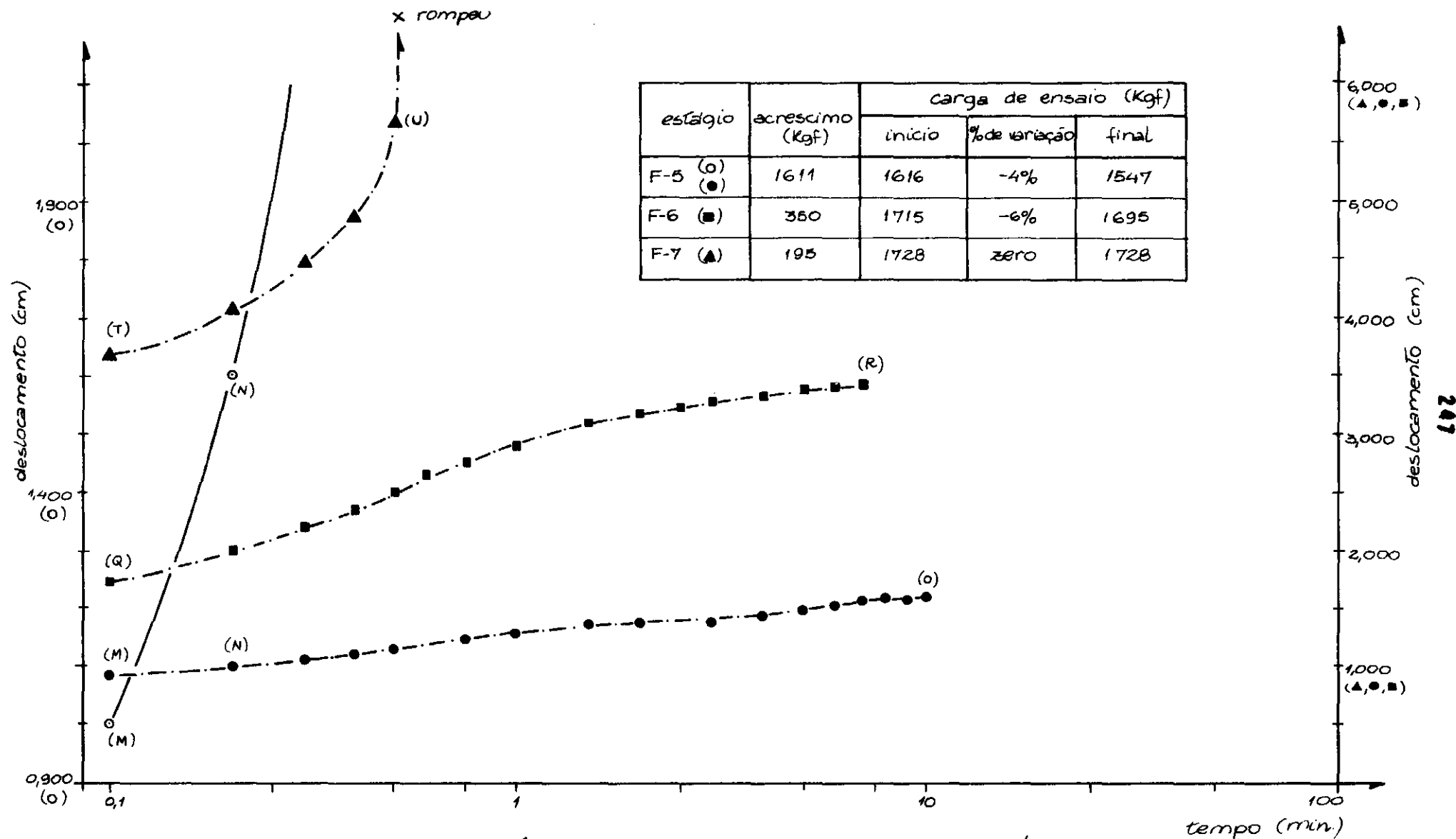


FIG. V. 63 b TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO F — ESTÁGIOS F-5, F-6, F-7).

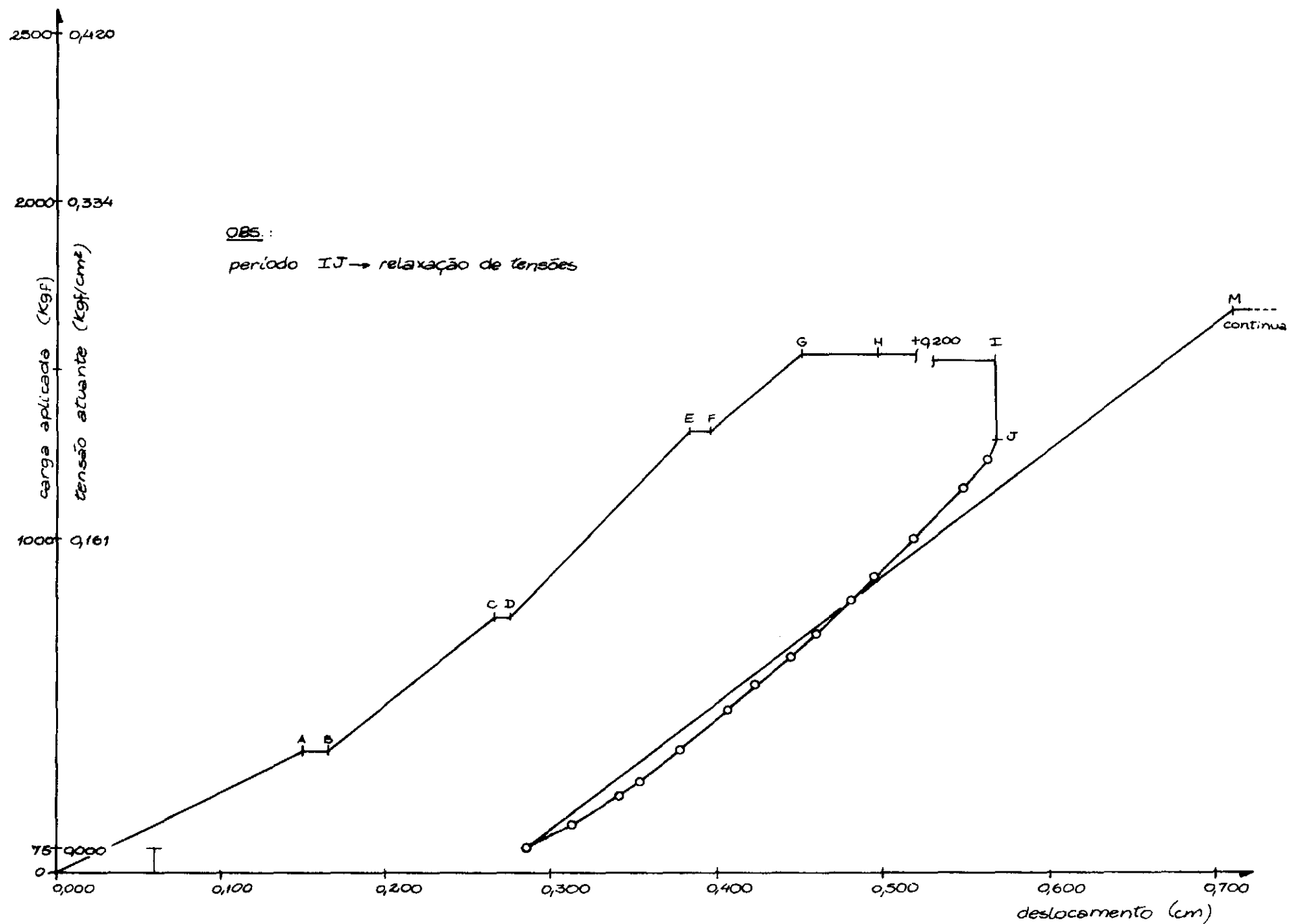


FIG. T. 64 a TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO F)

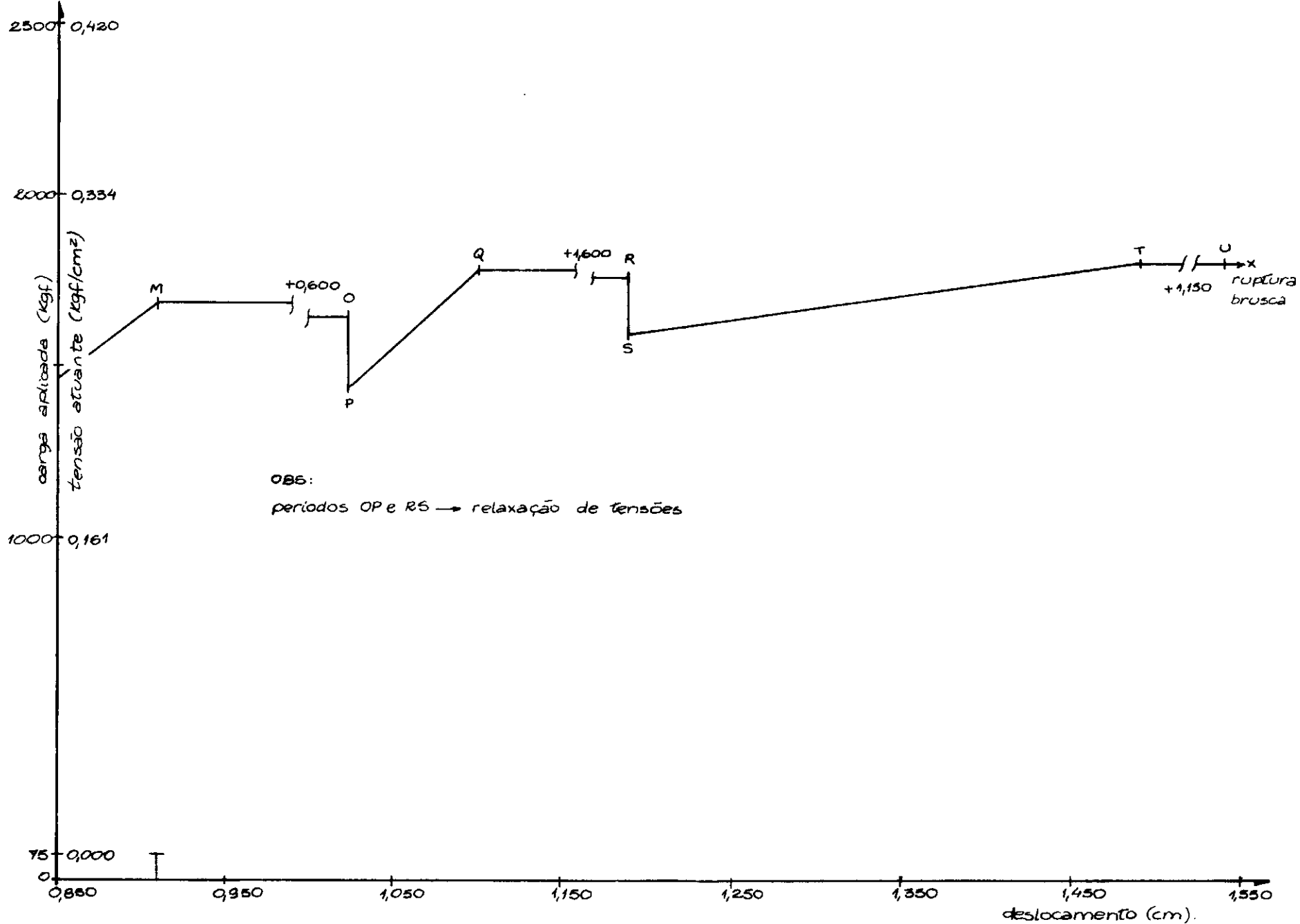


FIG. T. 64 b. TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO F, CONTINUAÇÃO).



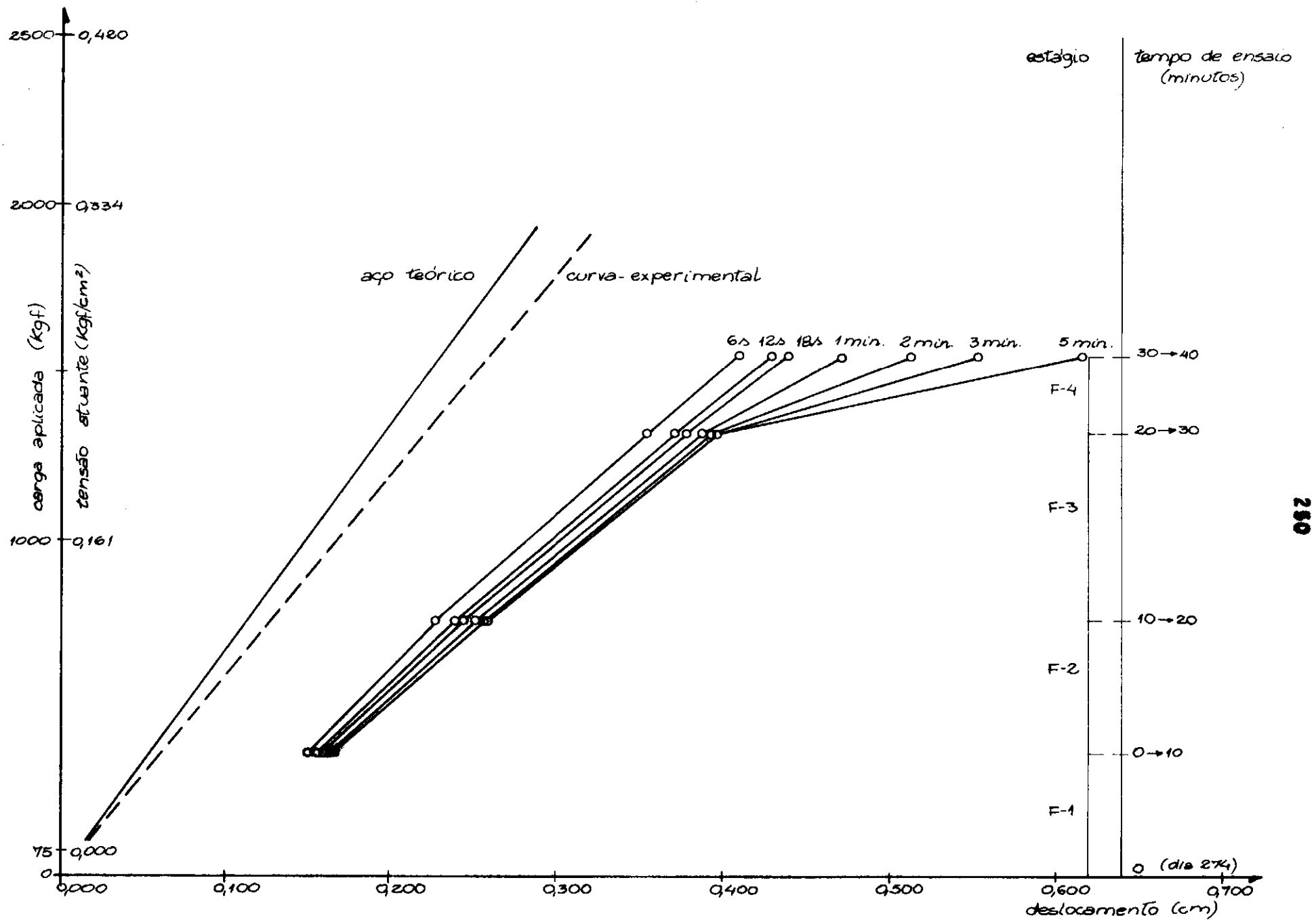


FIG. V.65 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO F - 1ª ETAPA DE CARREGAMENTO)

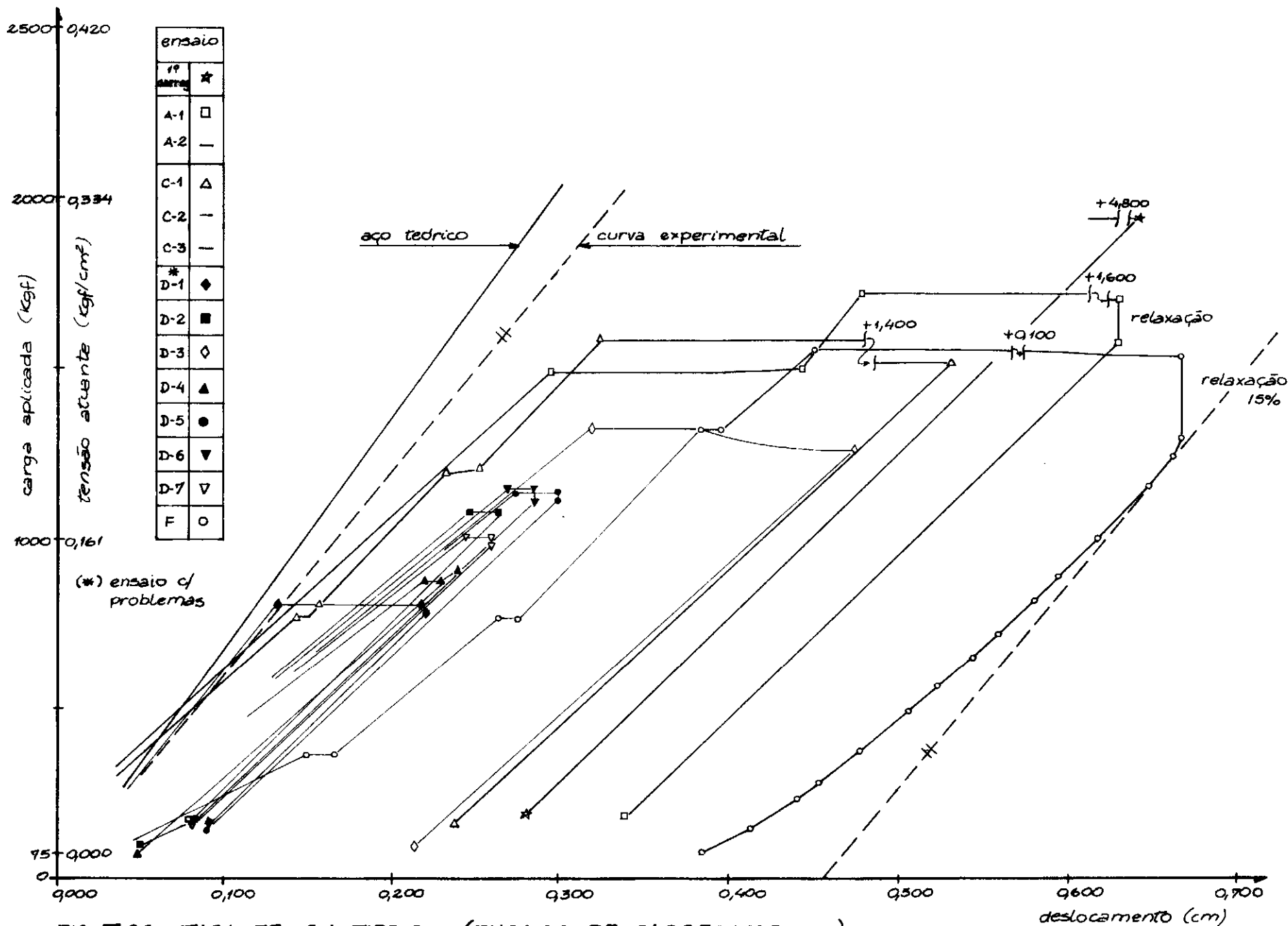


FIG. V.66 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIOS DE CARREGAMENTO)

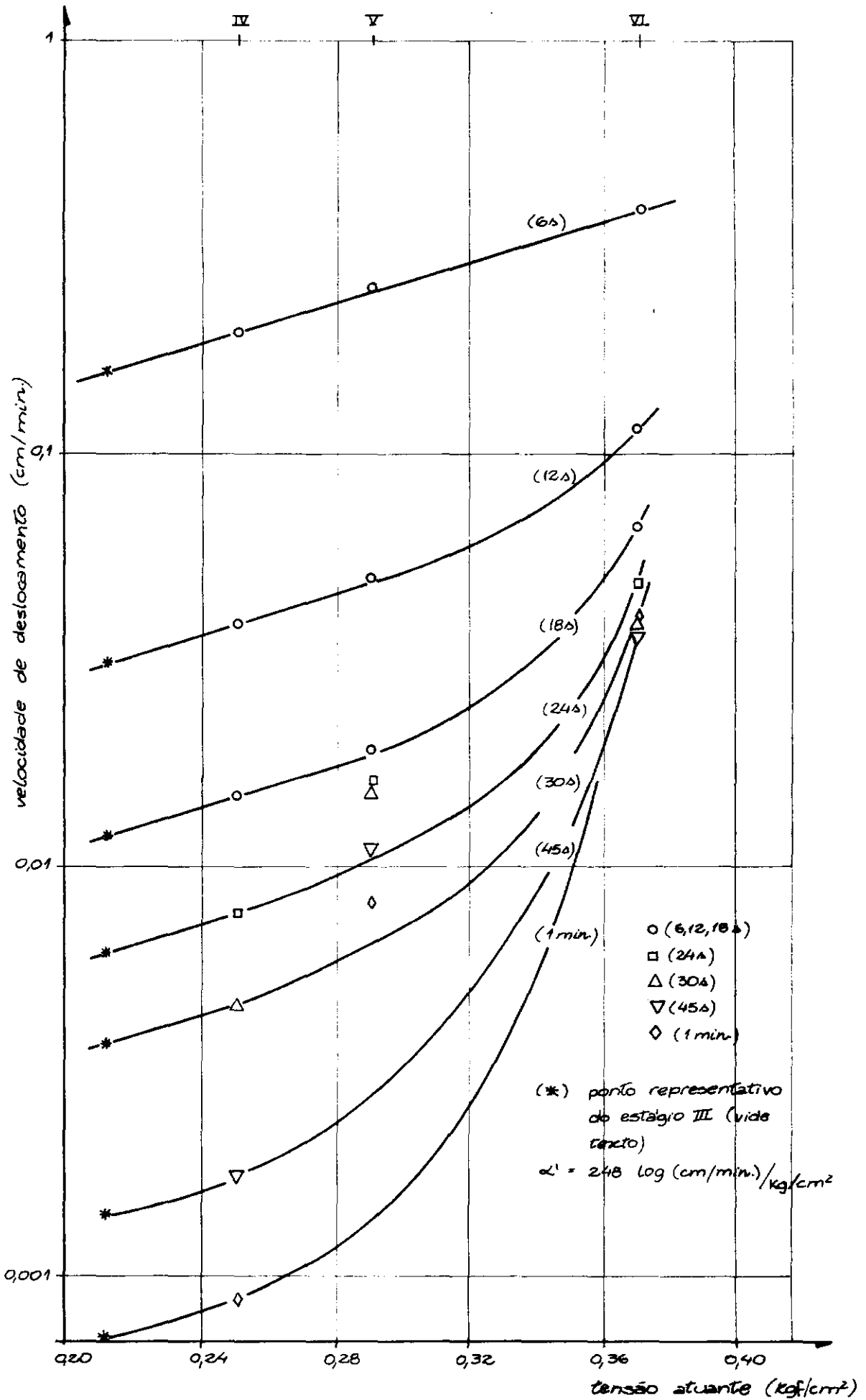


FIG. V. 67 TIRANTE S-1 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO).

variação de carga (%)

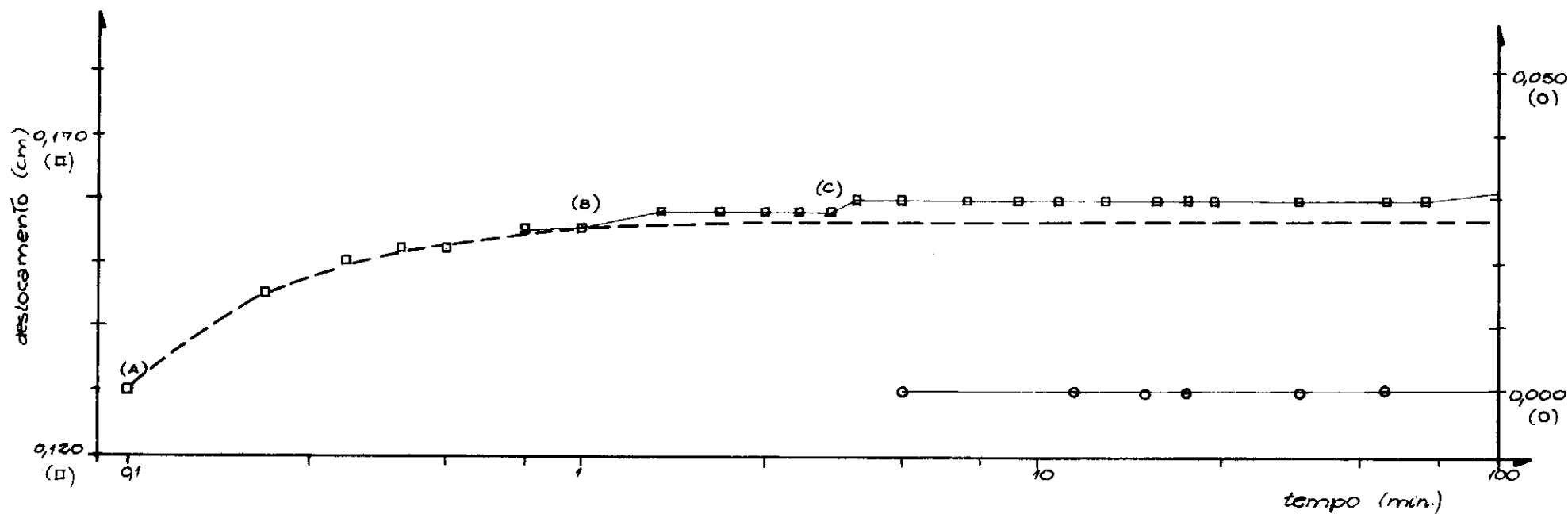
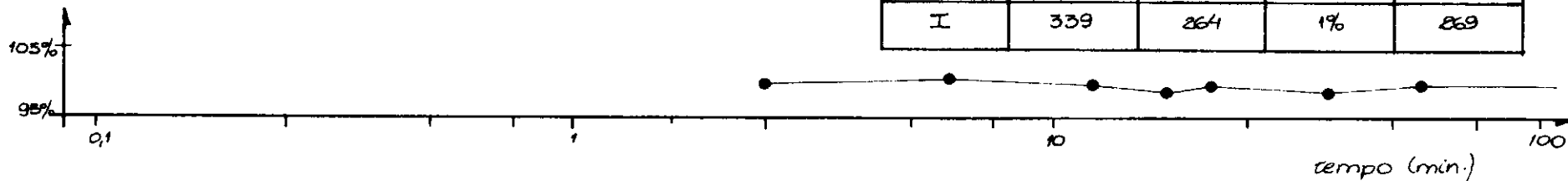


FIG. V.68a TIRANTE 5-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO I)

recalque da placa de referência (cm).

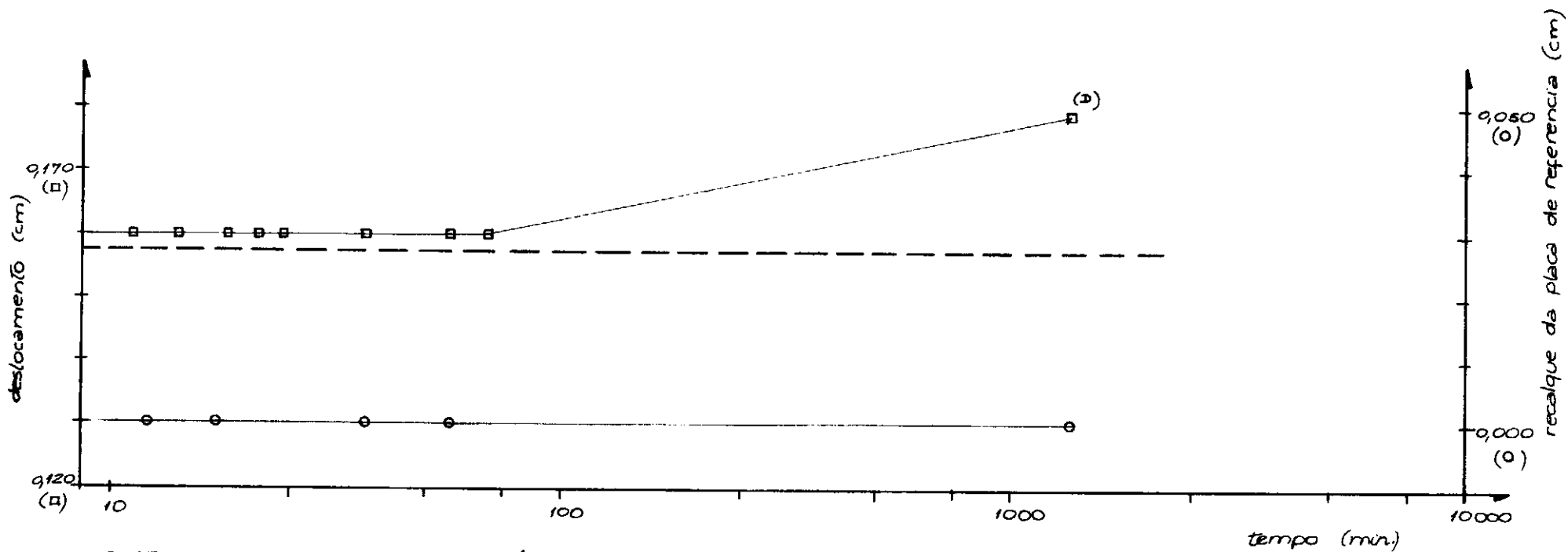
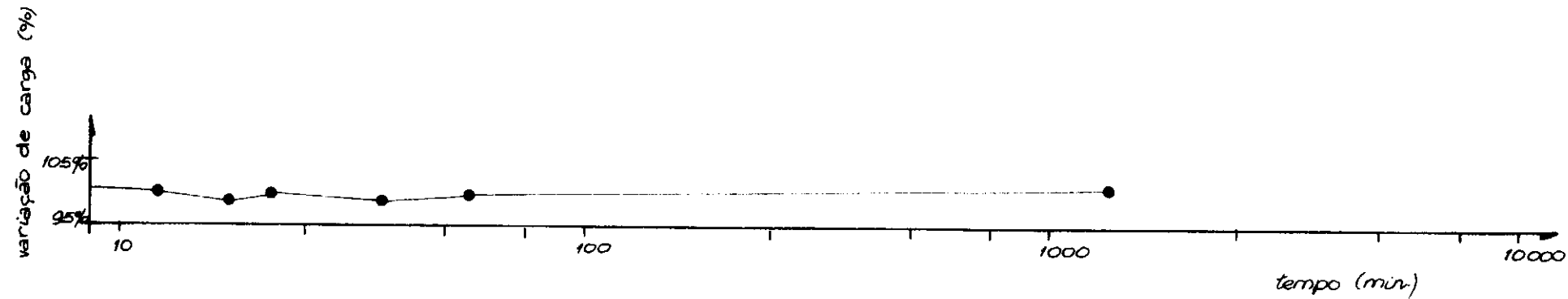


FIG. V.68 b TIRANTE S-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO I, CONTINUAÇÃO)

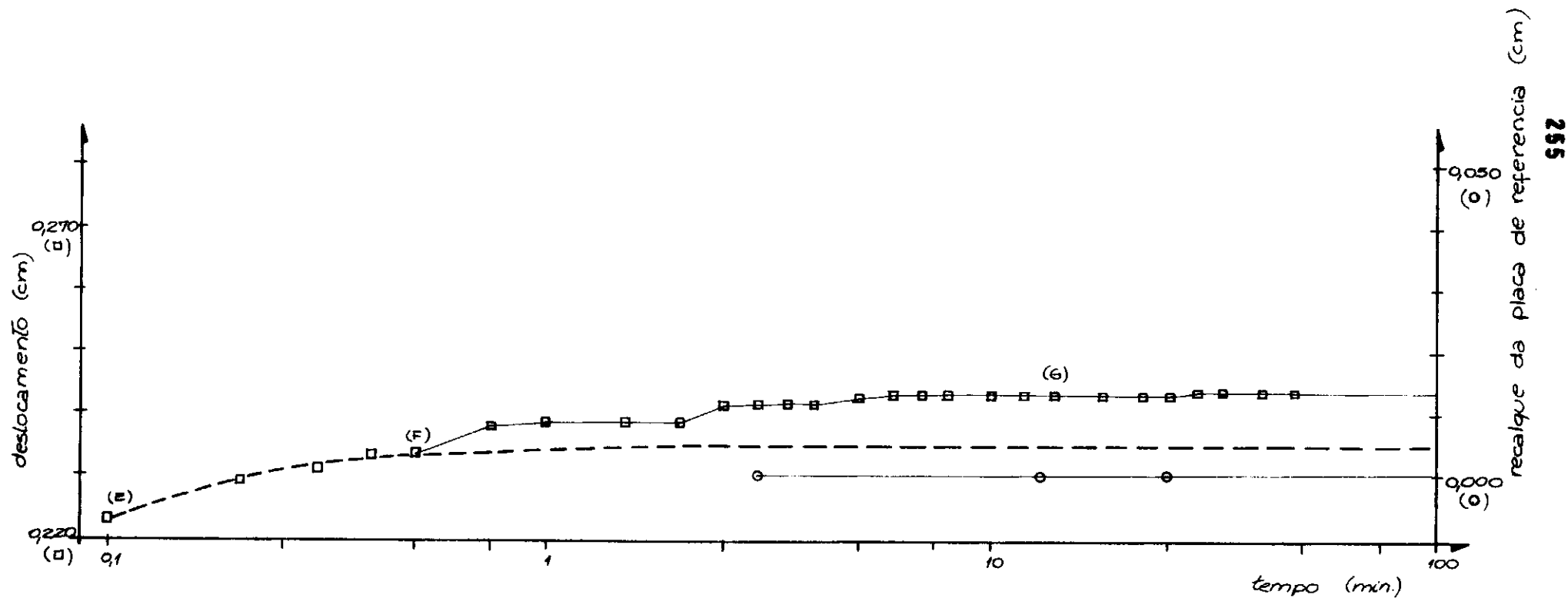
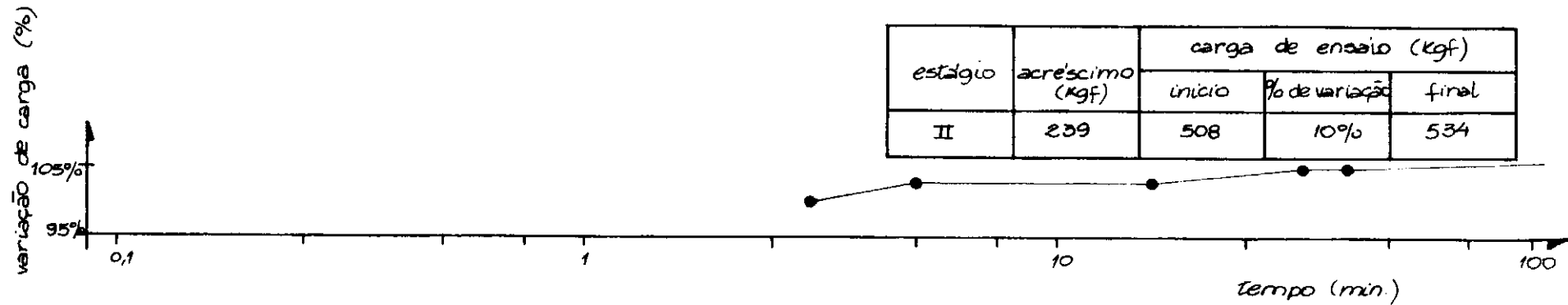


FIG. V.69 a TIRANTE S-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO II)

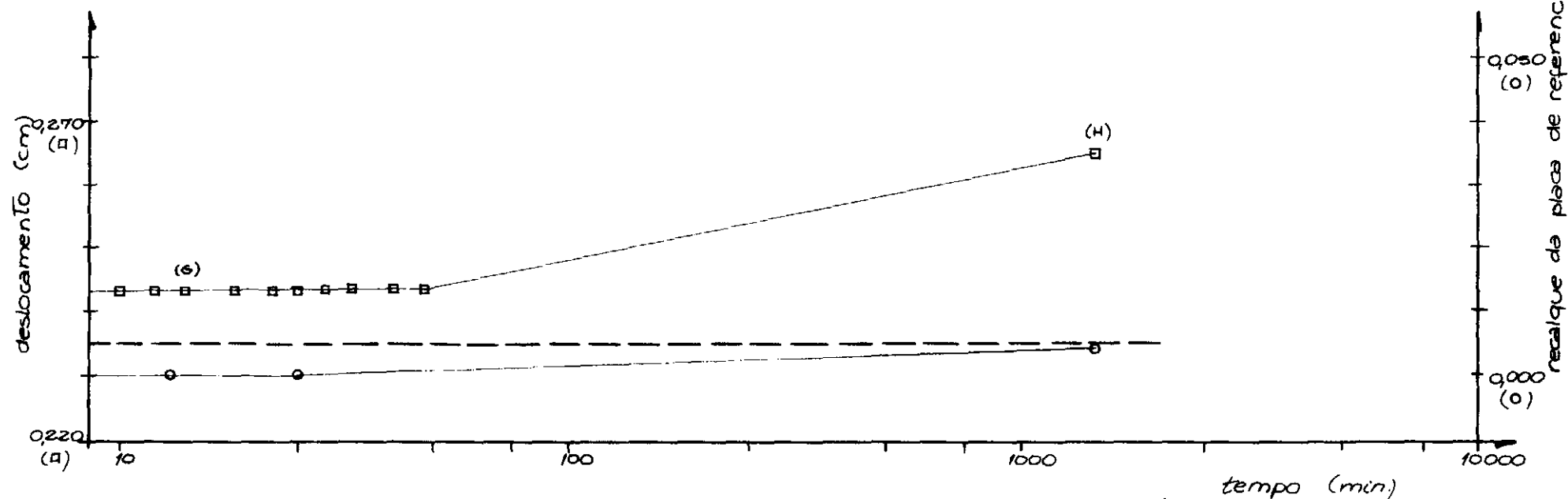
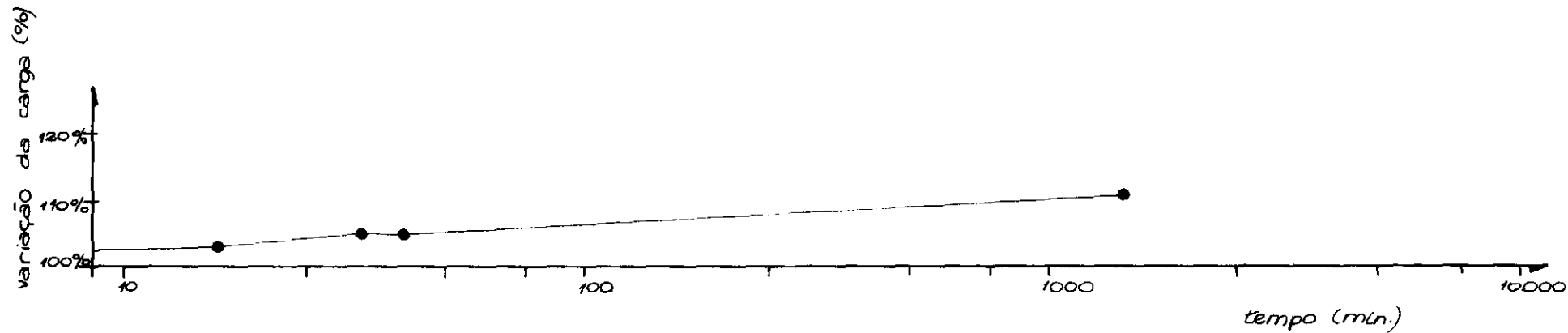


FIG. V.69 b TIRANTE 5-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO II, CONTINUAÇÃO)

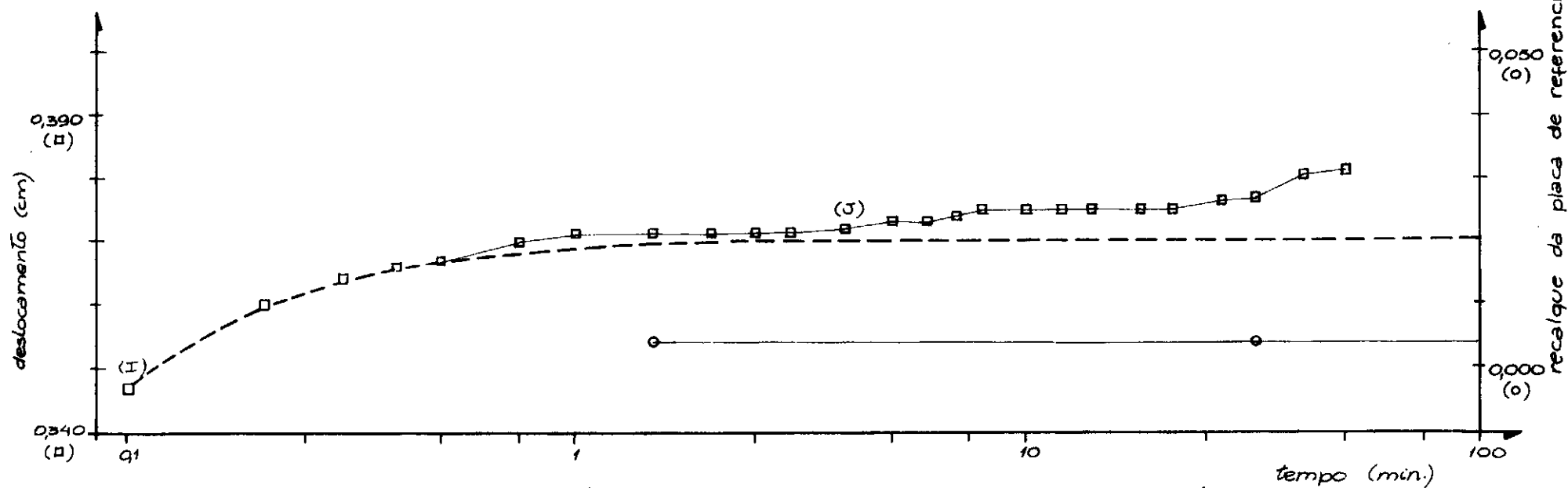
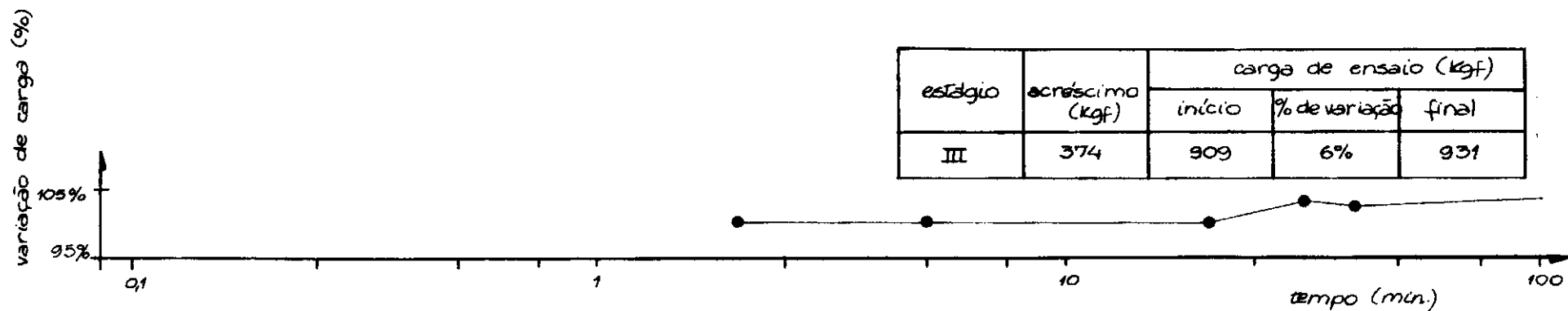


FIG. V. 70 a TIRANTE S-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO III)



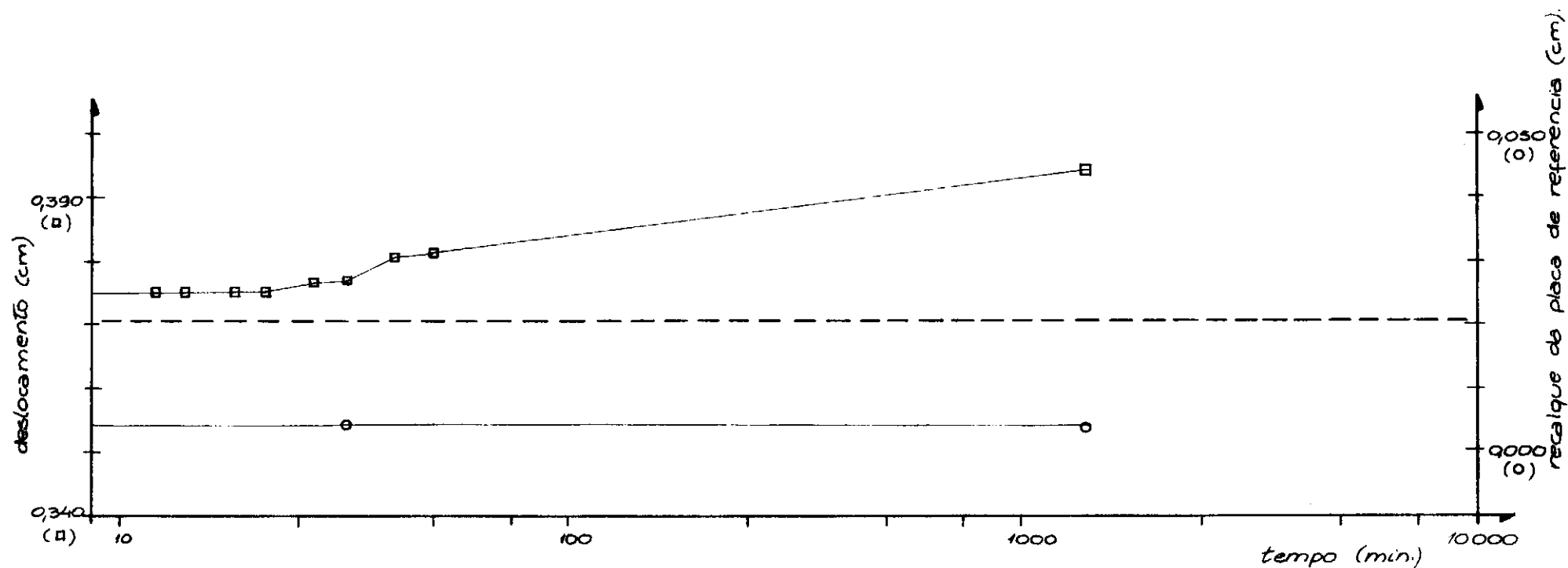
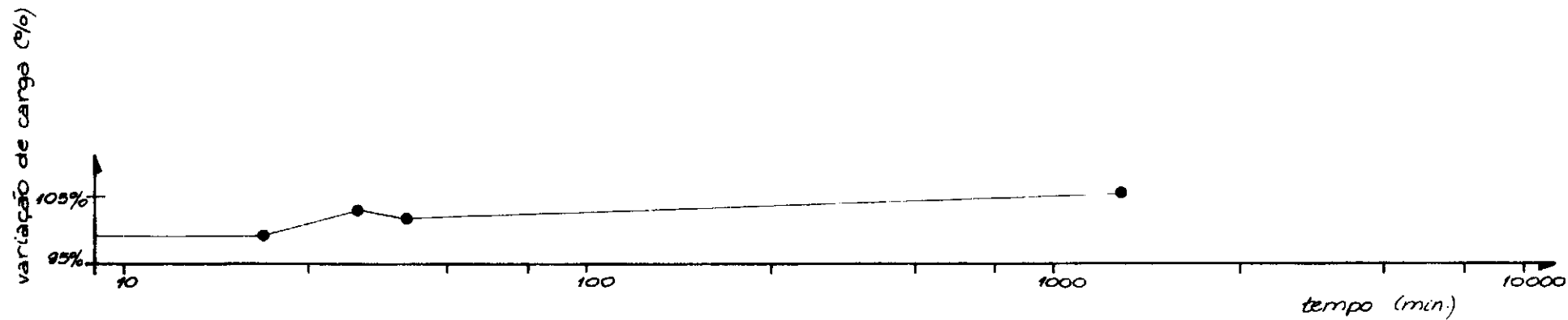


FIG. V.70 b TIRANTE S-3 TIPO I (ESTÁGIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO III, CONTINUAÇÃO)

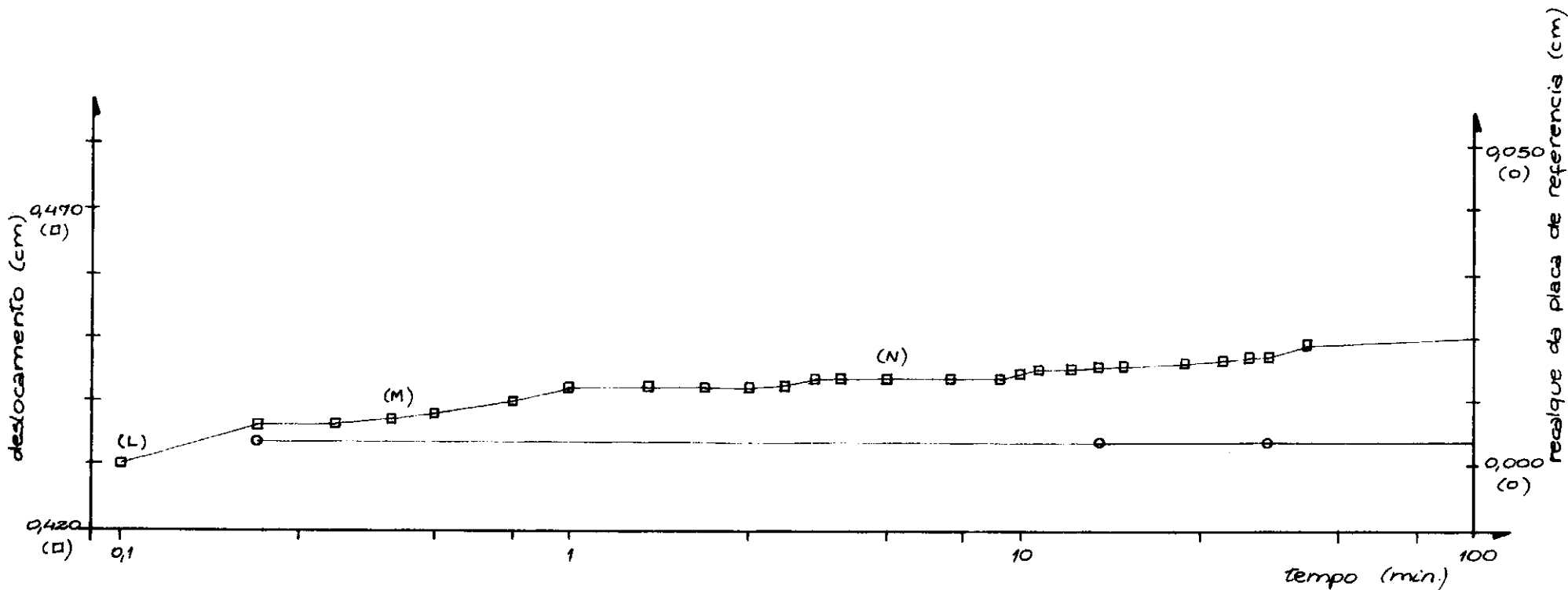
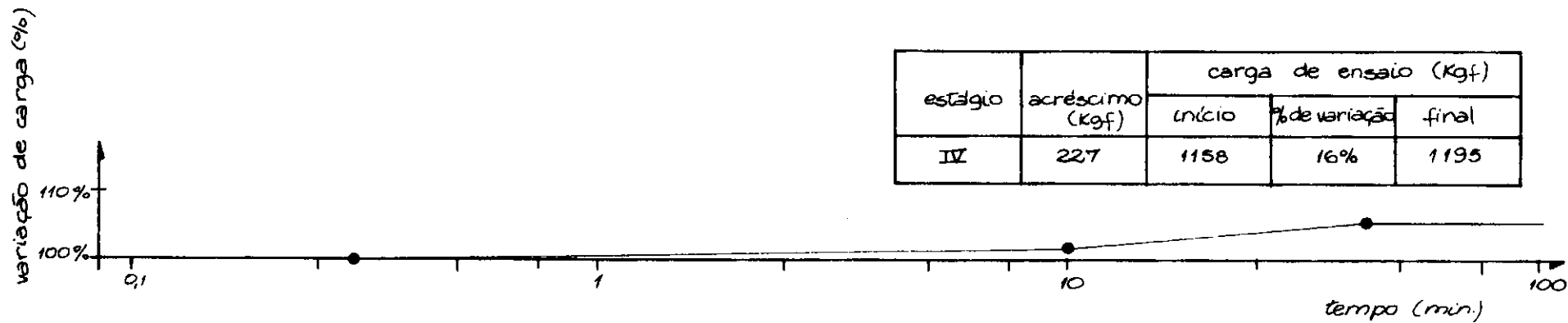


FIG. V.71 a TIRANTE 5-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO IV).

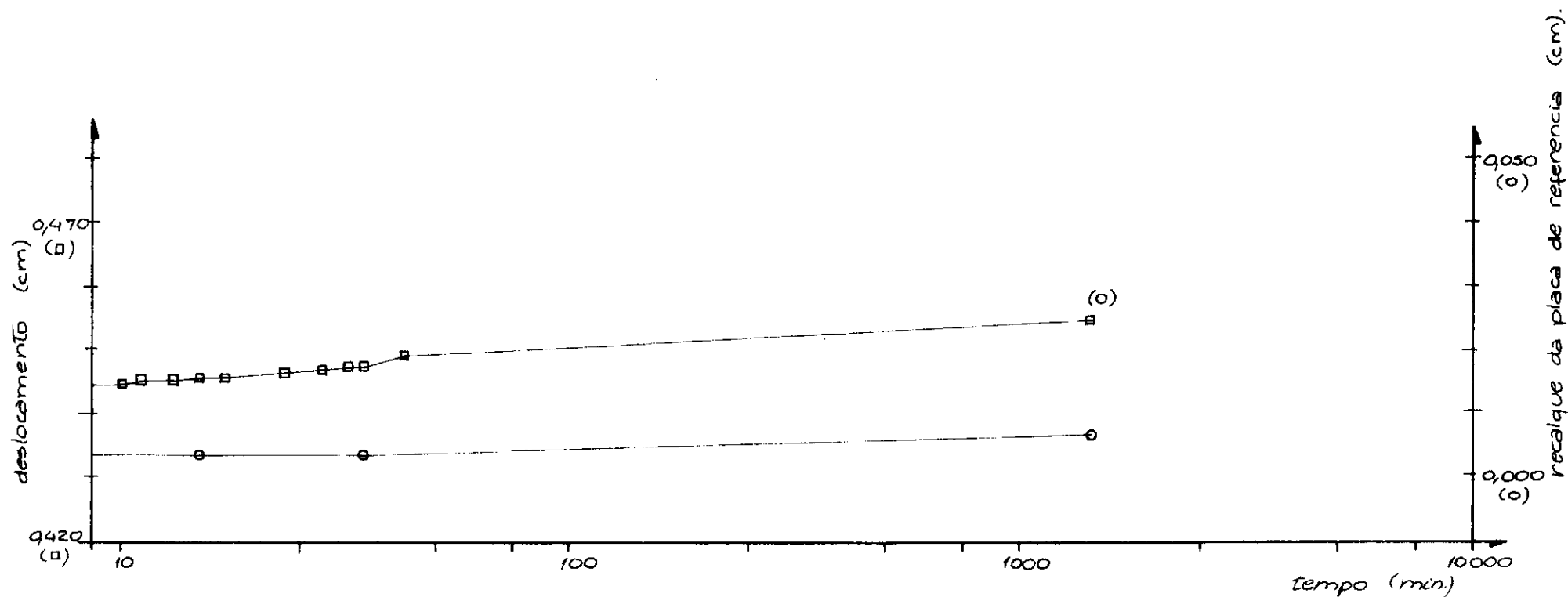
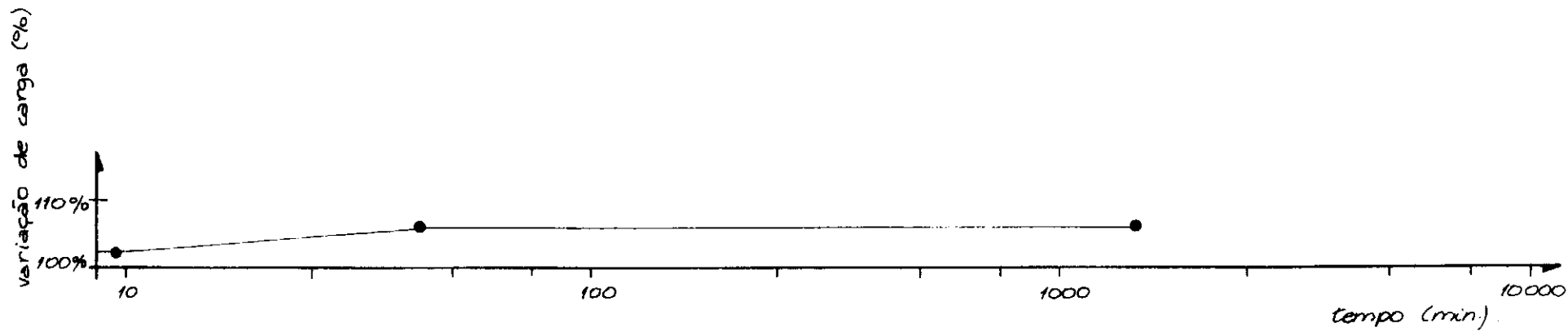


FIG. V.71 b TIRANTE 5-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO IV, CONTINUAÇÃO)

variação de carga (%)

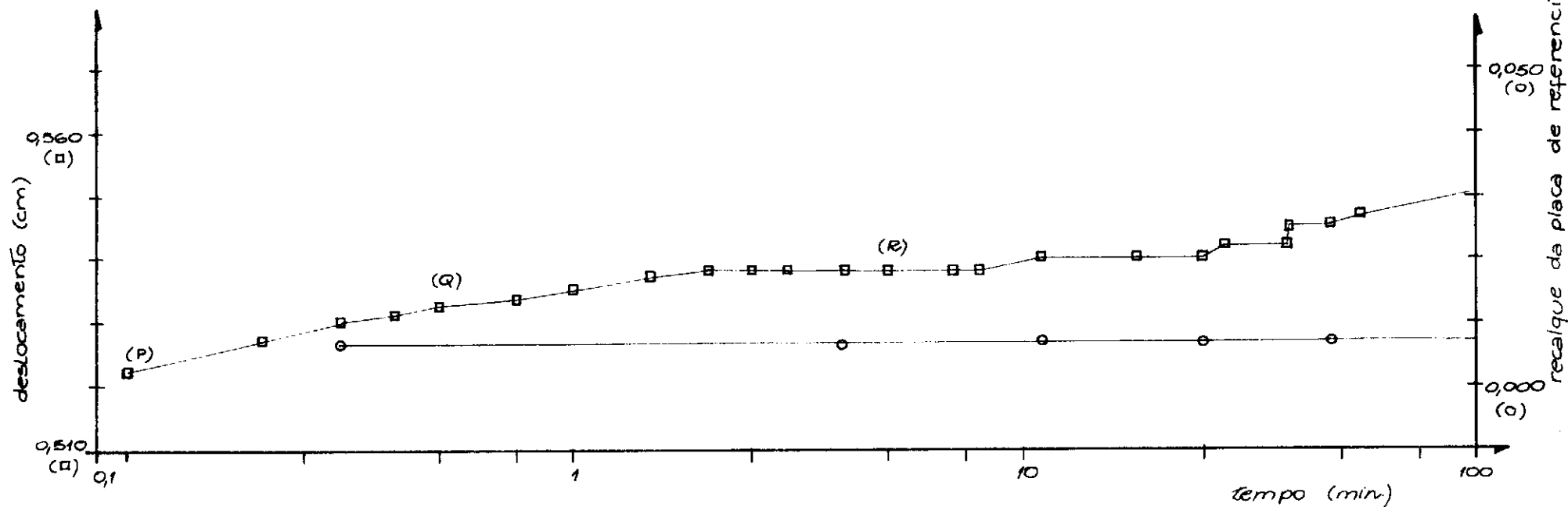
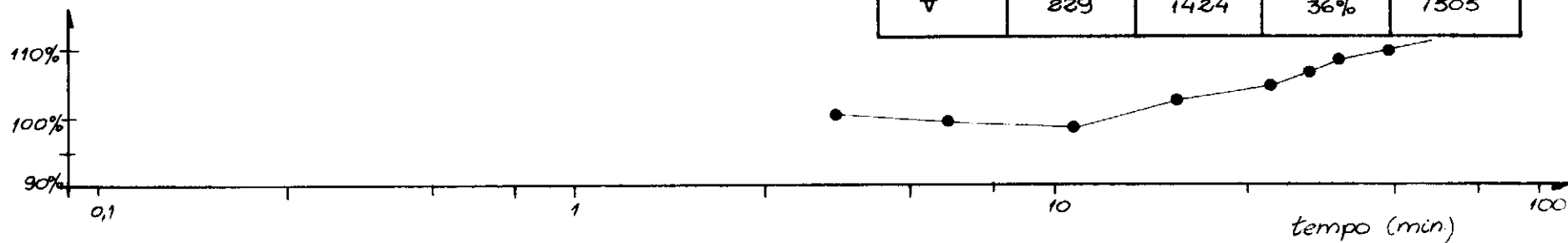


FIG. V.72a TIRANTE S-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO V)

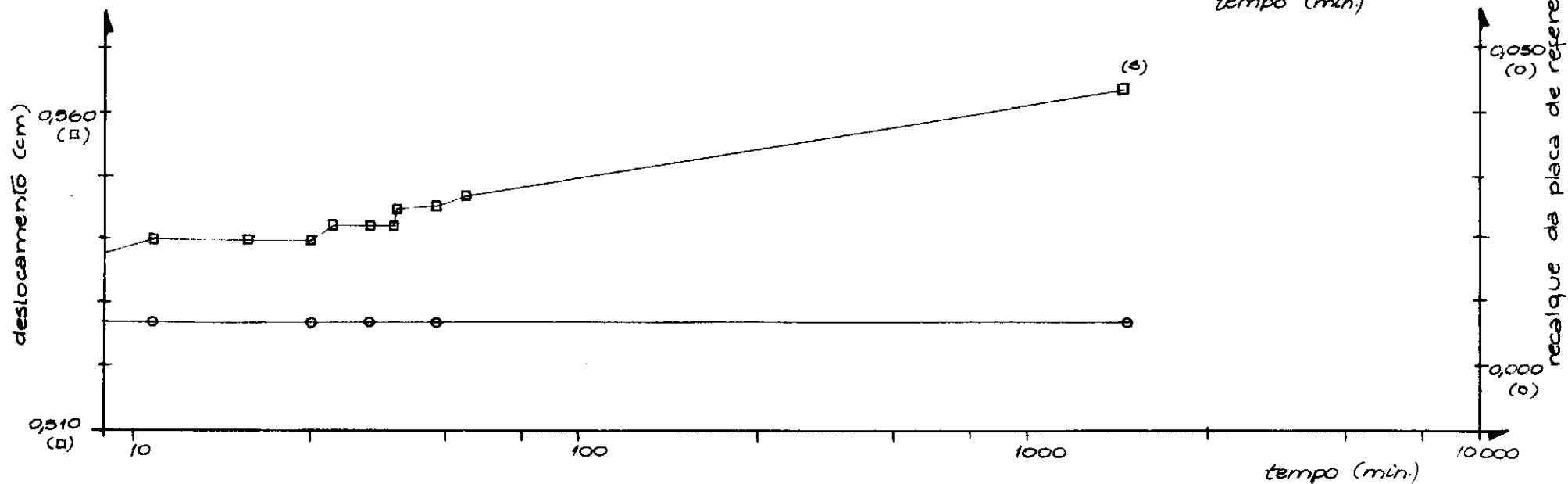
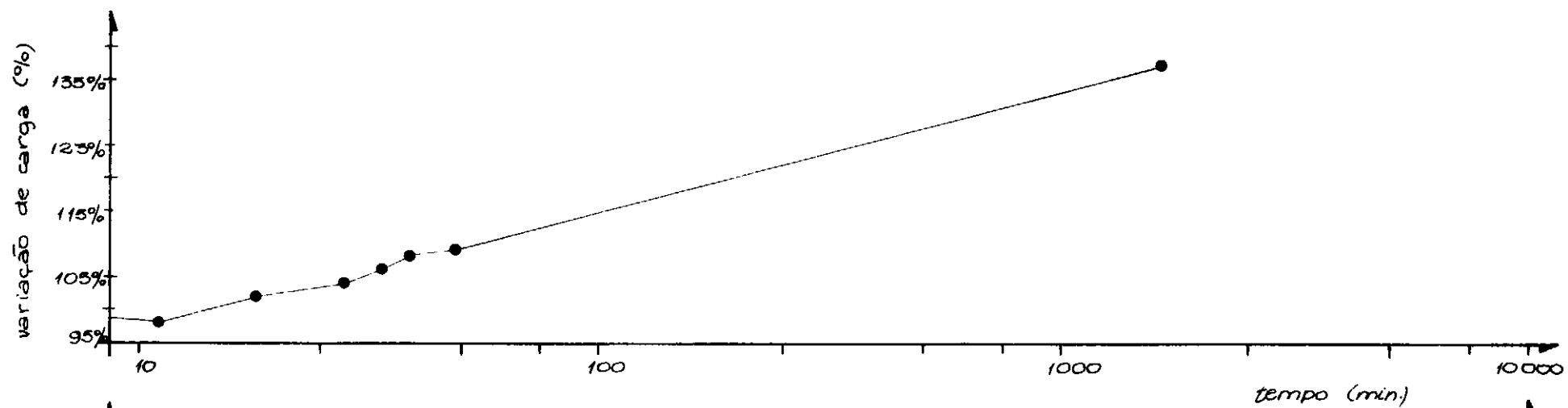


FIG. V.72 b TIRANTE S-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO -ESTÁGIO V, CONTINUAÇÃO)

variação de carga (%)

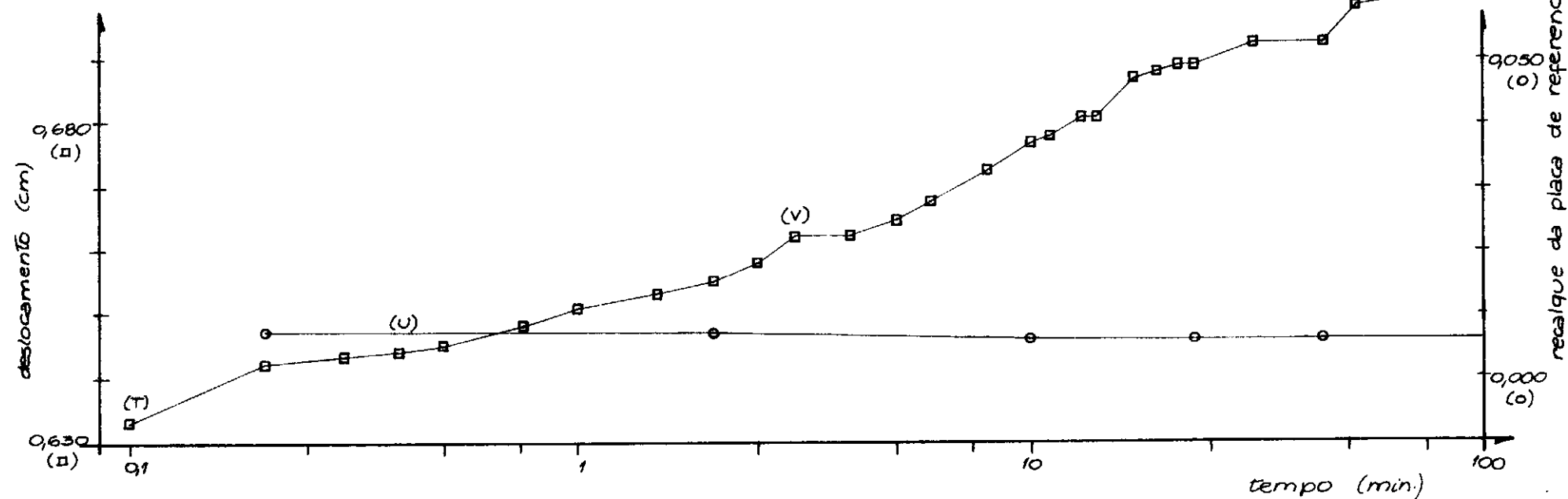
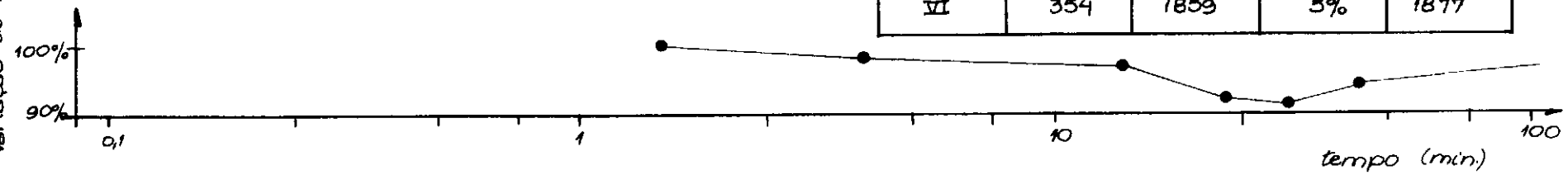


FIG. V.73 a TIRANTE S-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO VI)

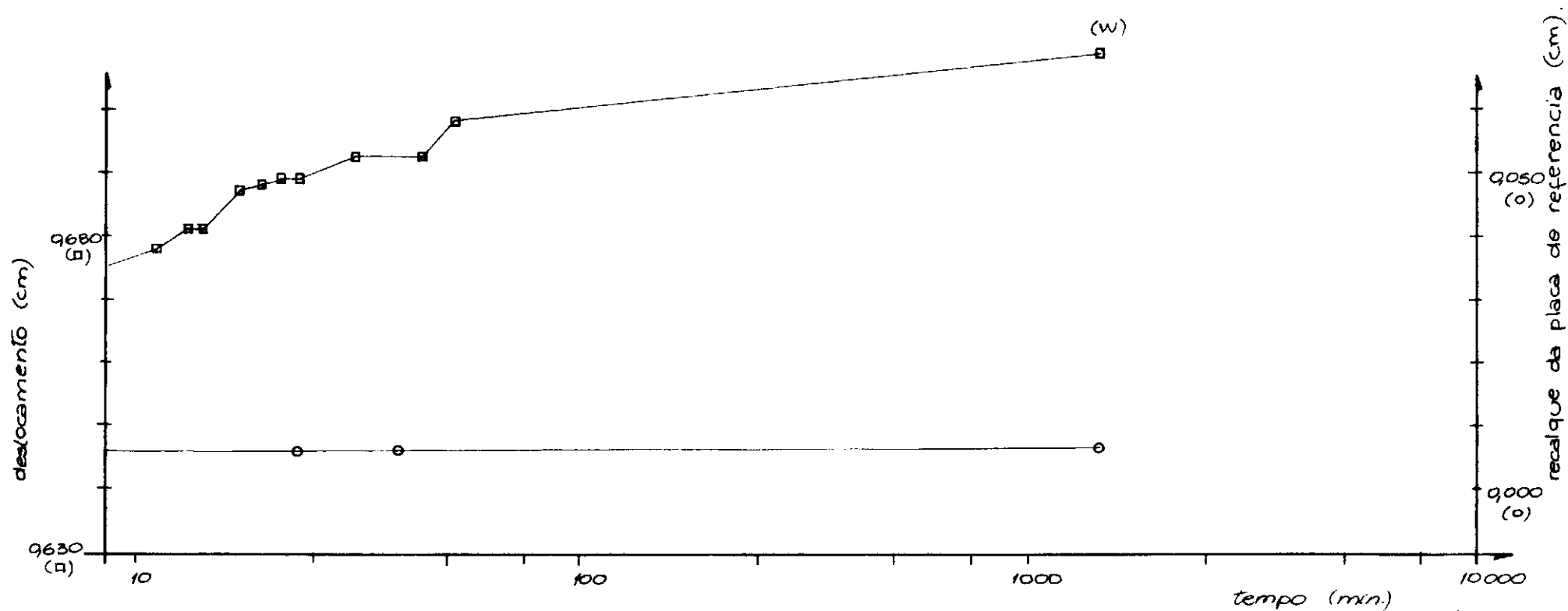
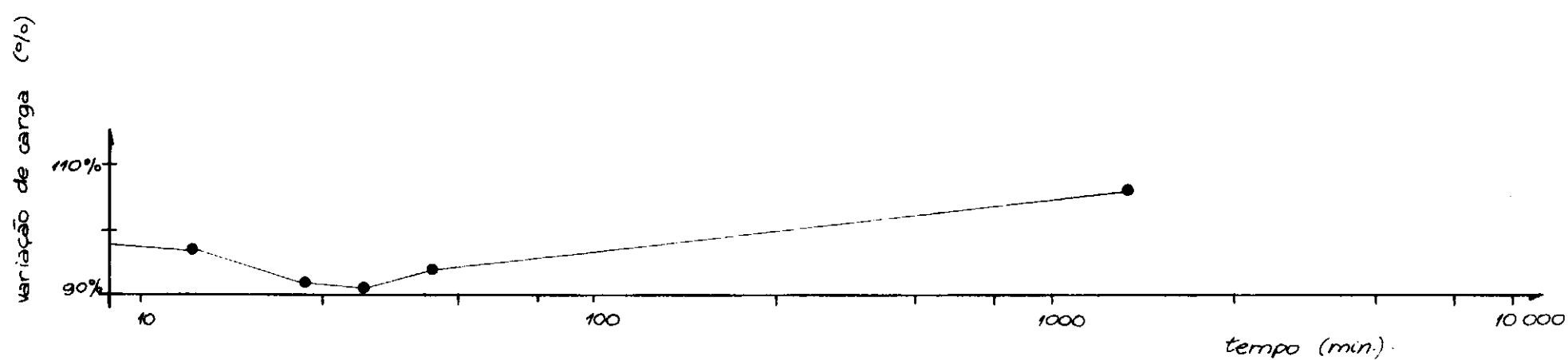


FIG. V. 73 b TIRANTE S-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO II, CONTINUAÇÃO).

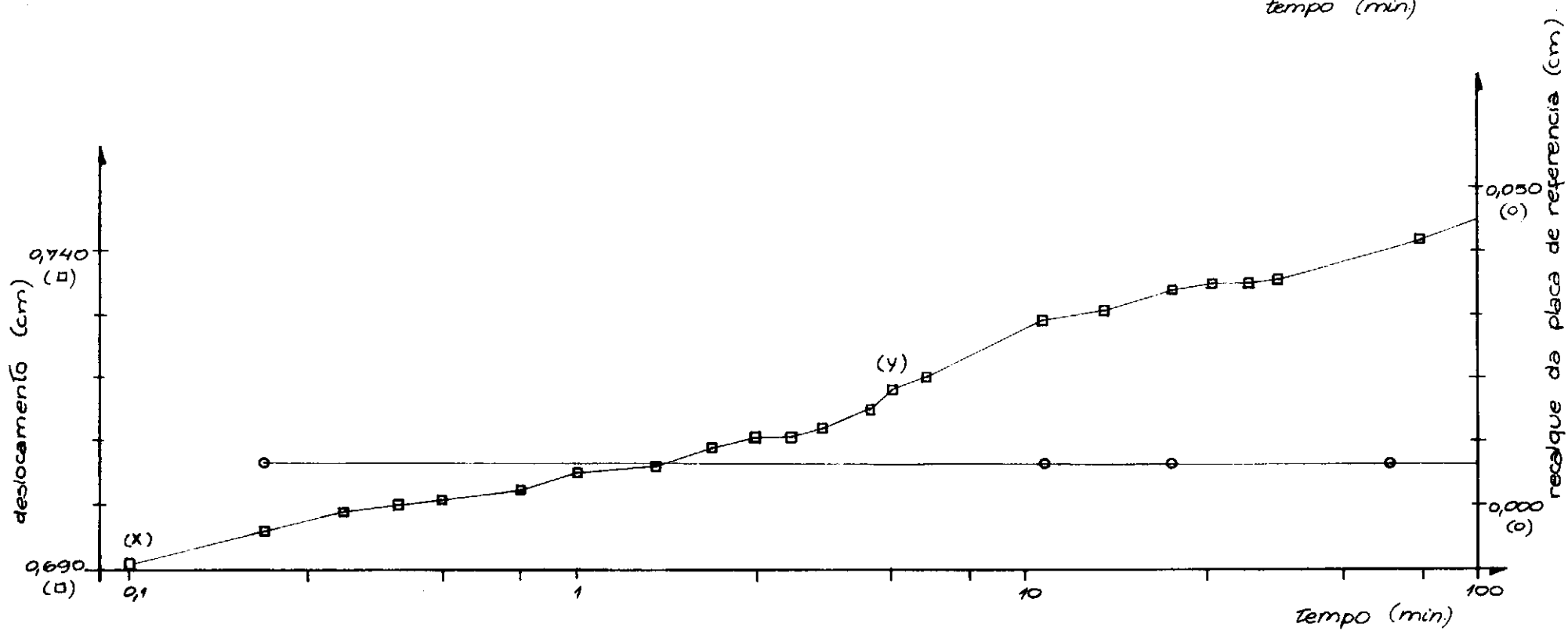
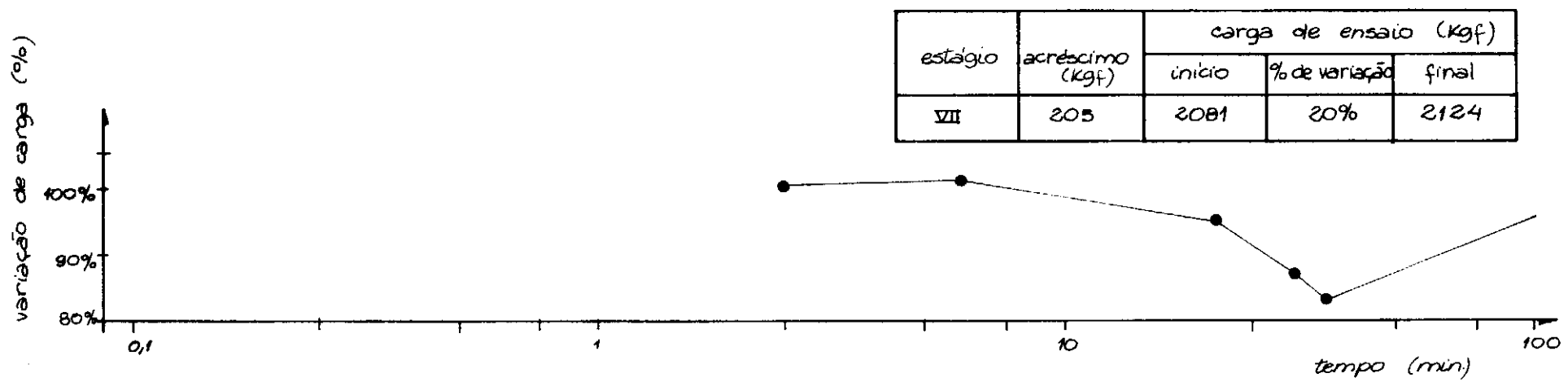


FIG. T. 74 a TIRANTE 3-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO — ESTÁGIO VII).



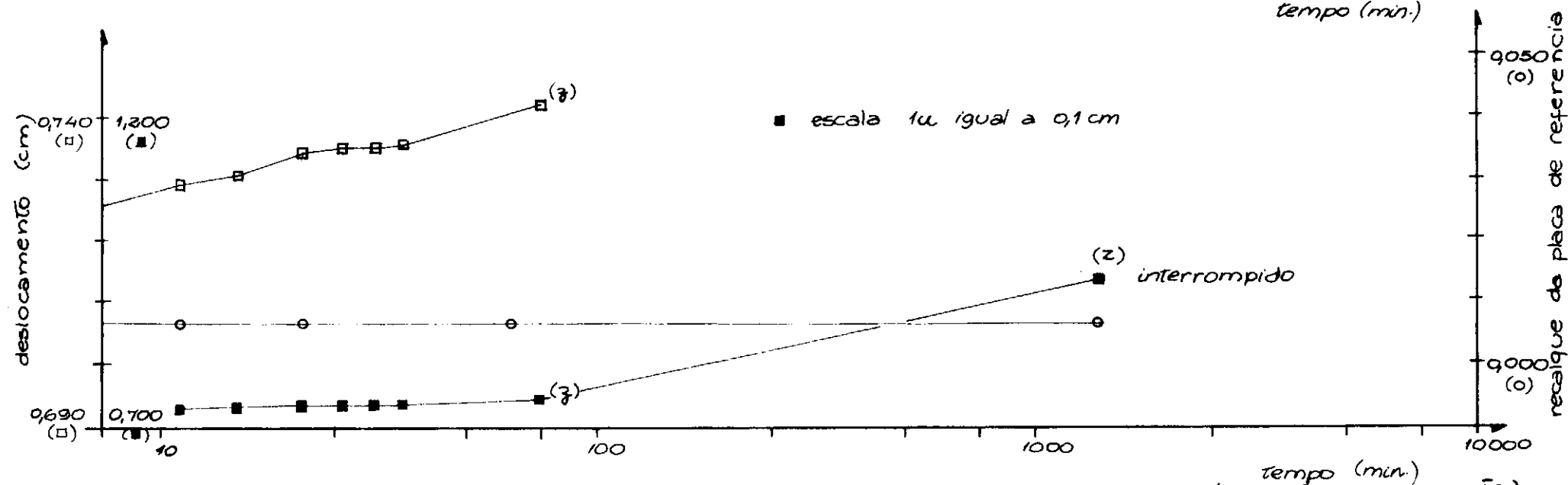
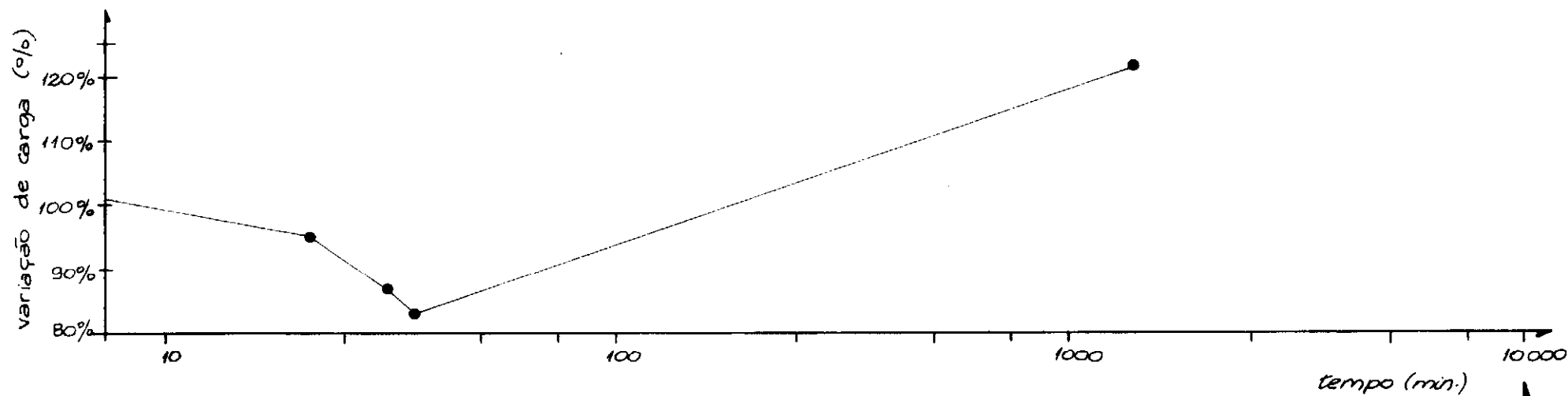


FIG. V.74 b TIRANTE 5-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO VII, CONTINUAÇÃO)

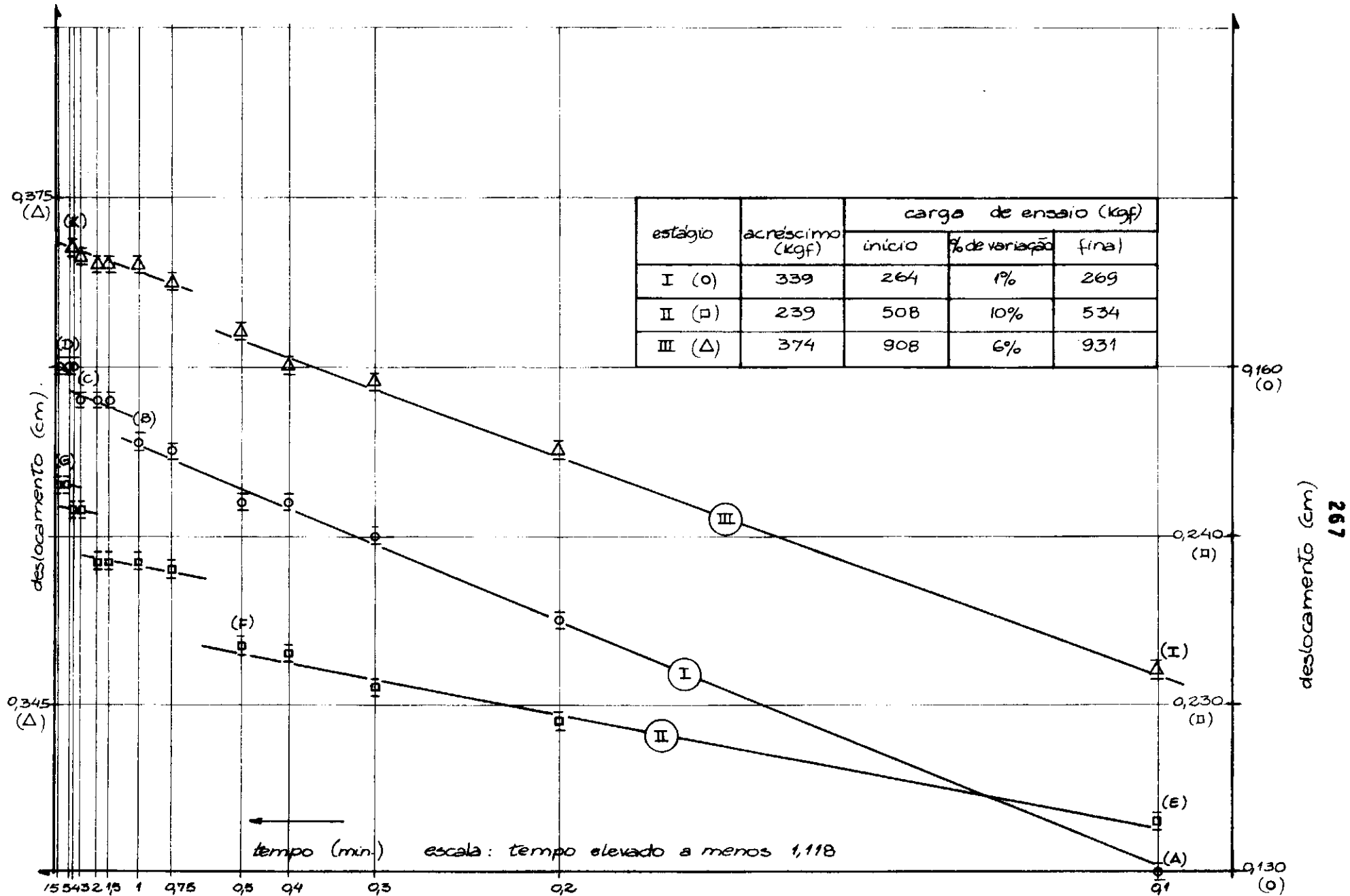


FIG. V.75 TIRANTE 3-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIOS I, II, III)

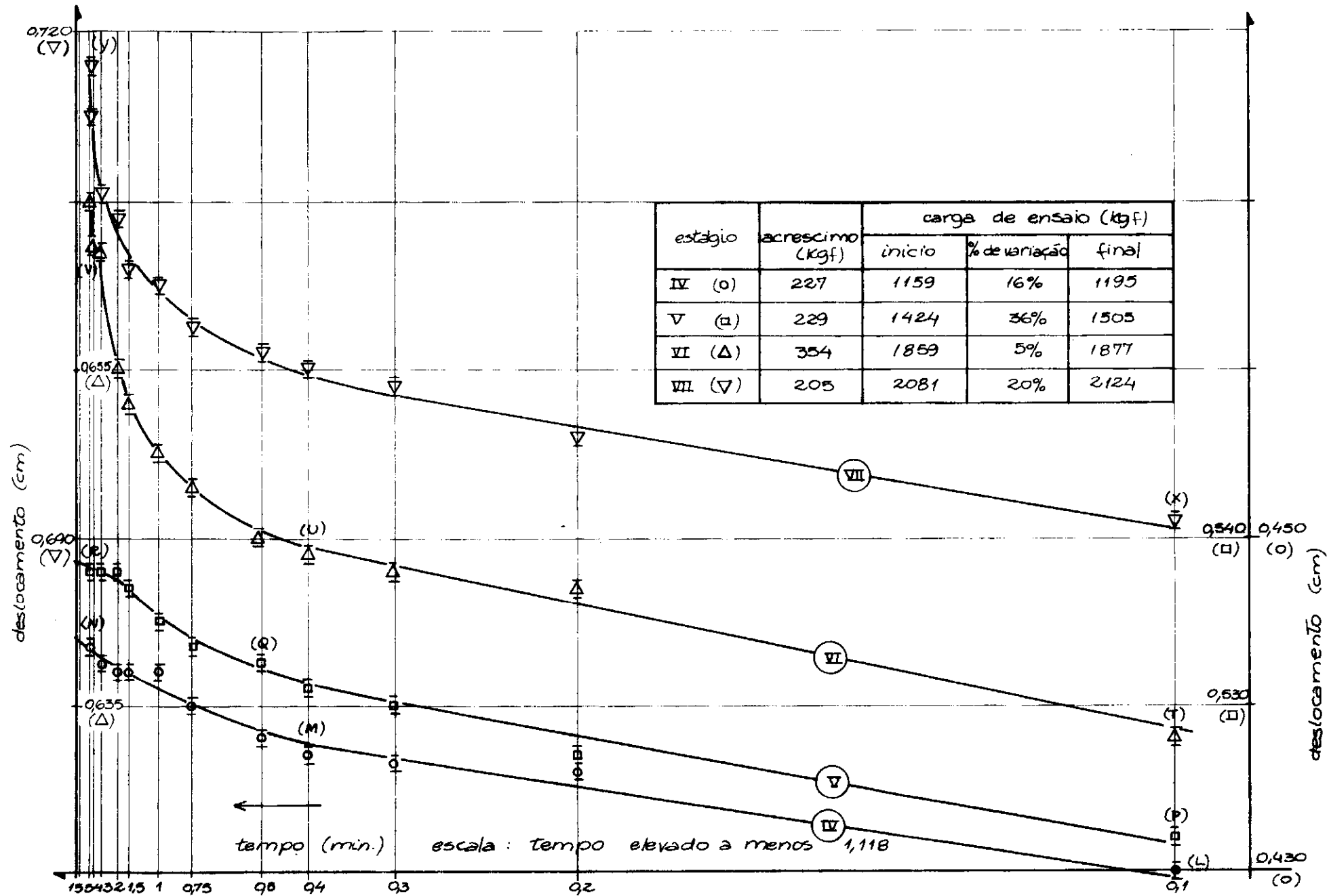


FIG. V.76 TIRANTE 3-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIOS IV, V, VI E VII).

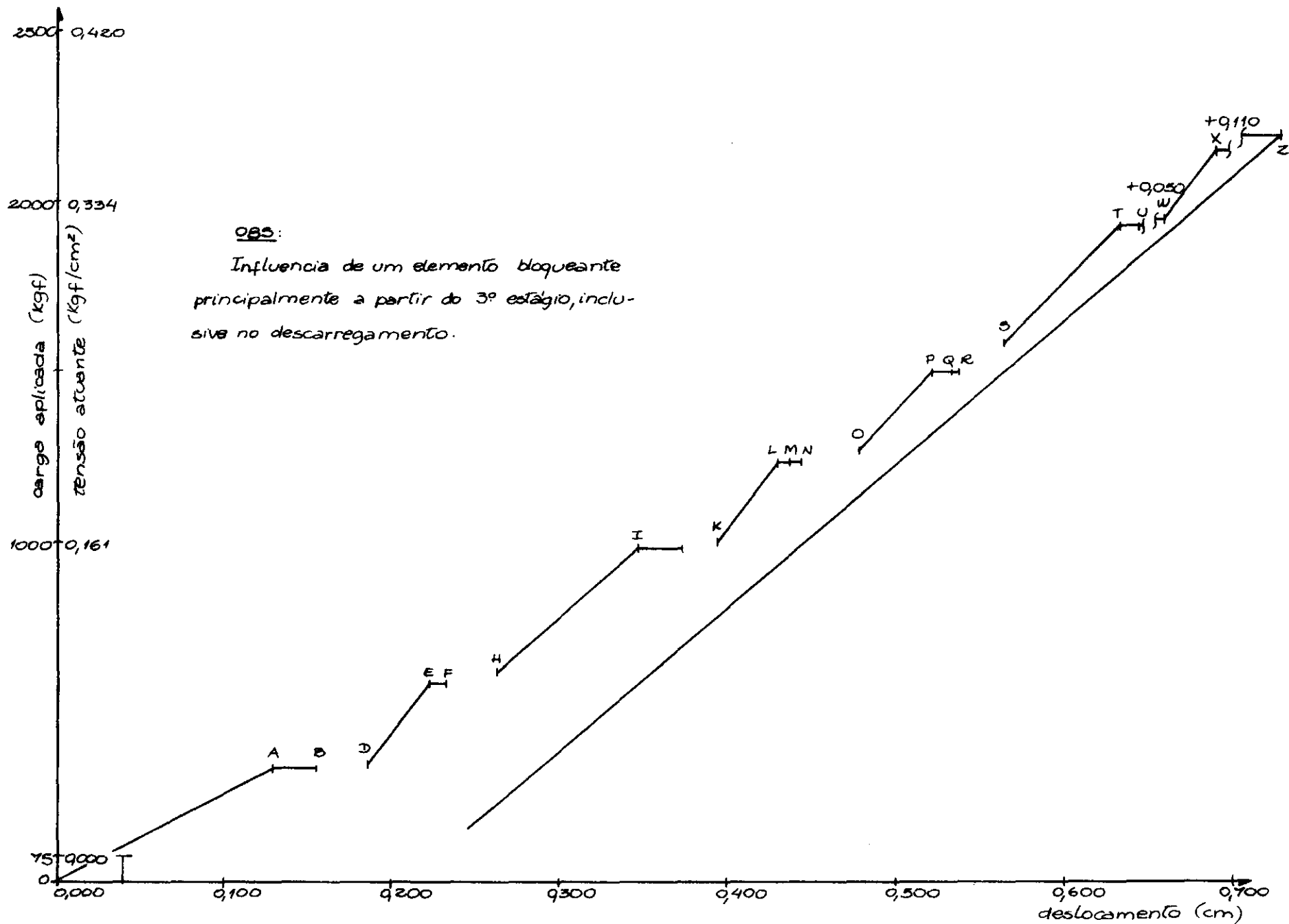


FIG. V.77 TIRANTE S-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO)

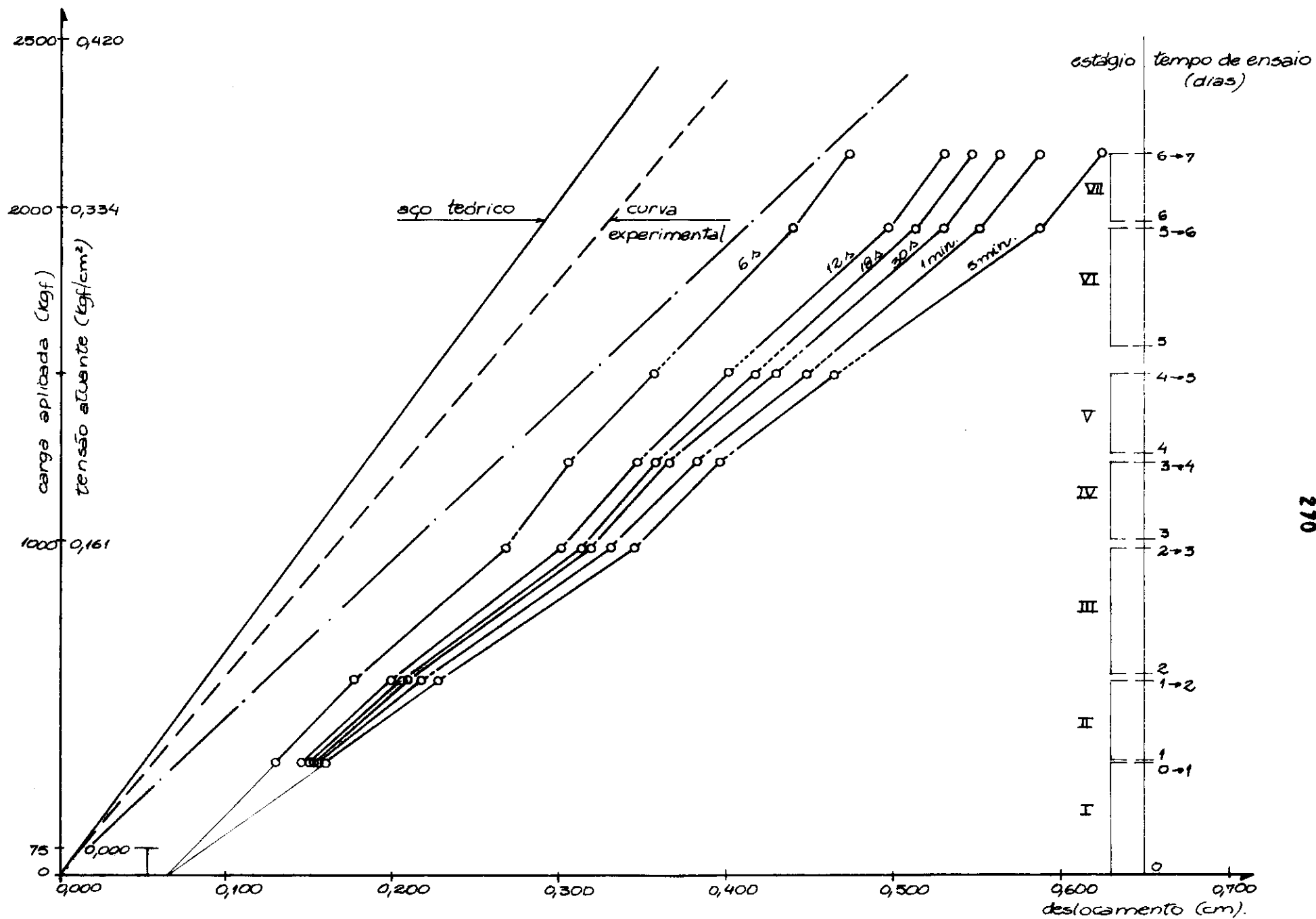


FIG. V.78 TIRANTE 6-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO).

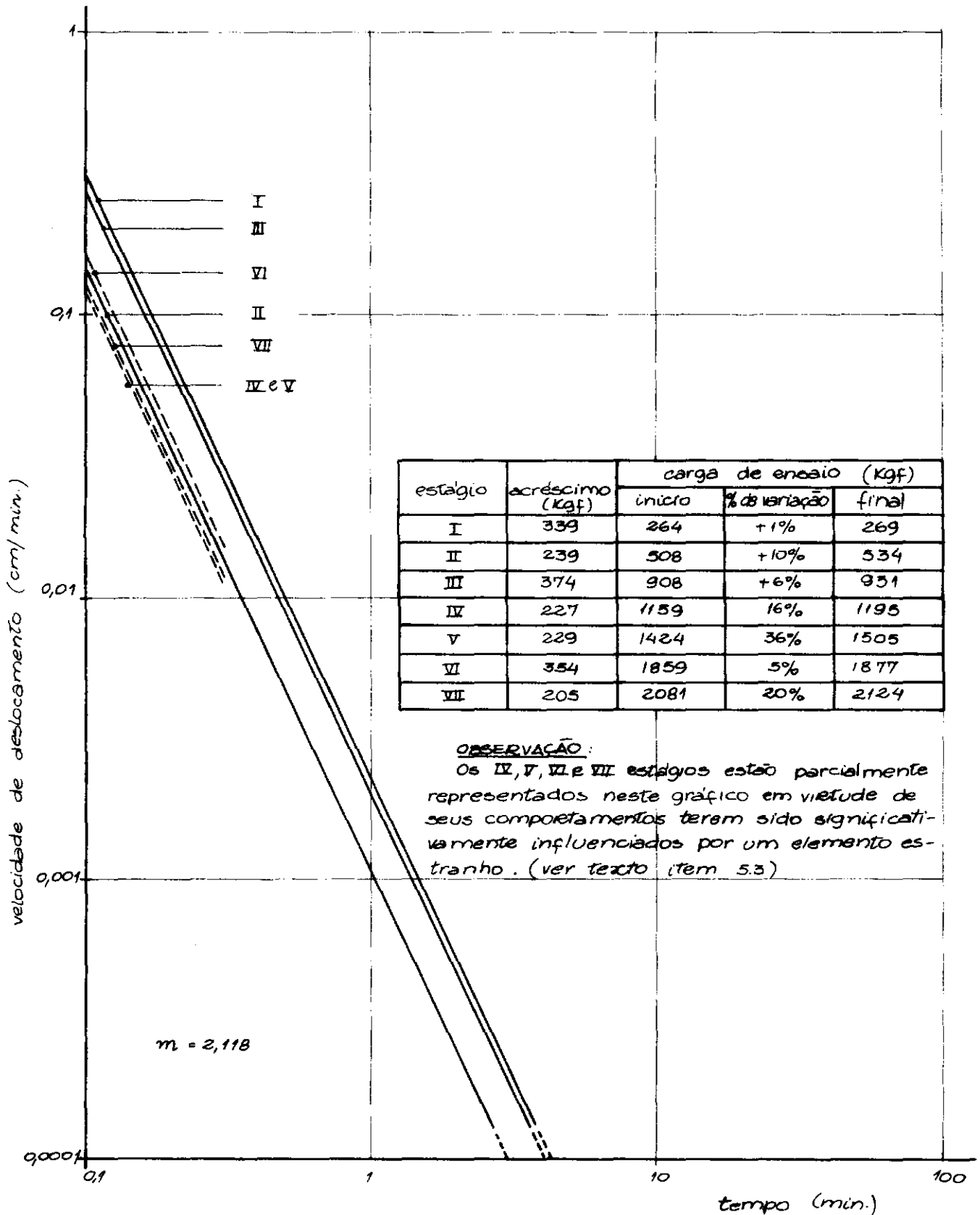


FIG. V. 79 TIRANTE 3-3 TIPO I (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO).

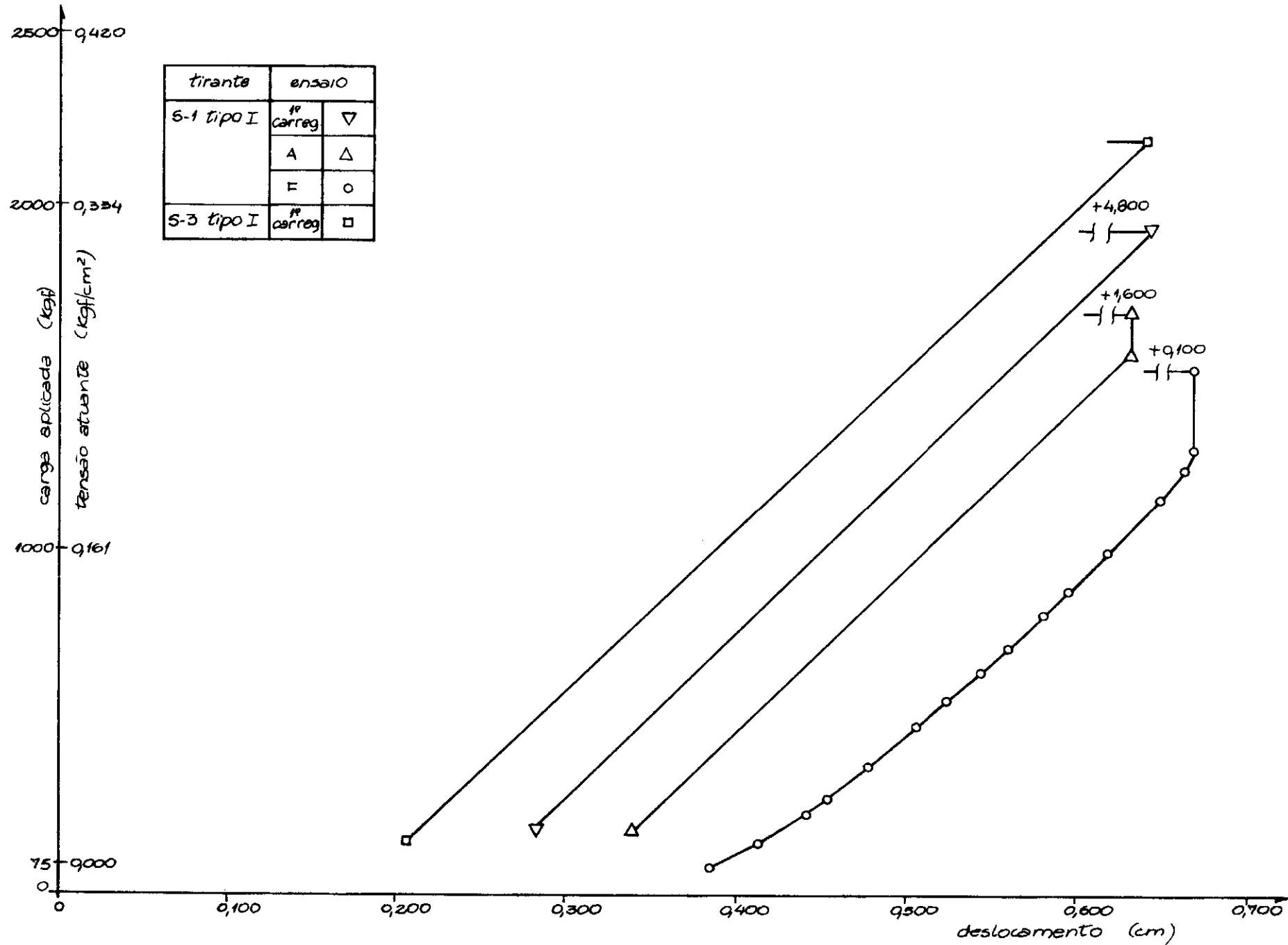


FIG. V.80 TIRANTES S-1 TIPO I E S-3 TIPO I (ENSAIOS DE DESCARREGAMENTO)

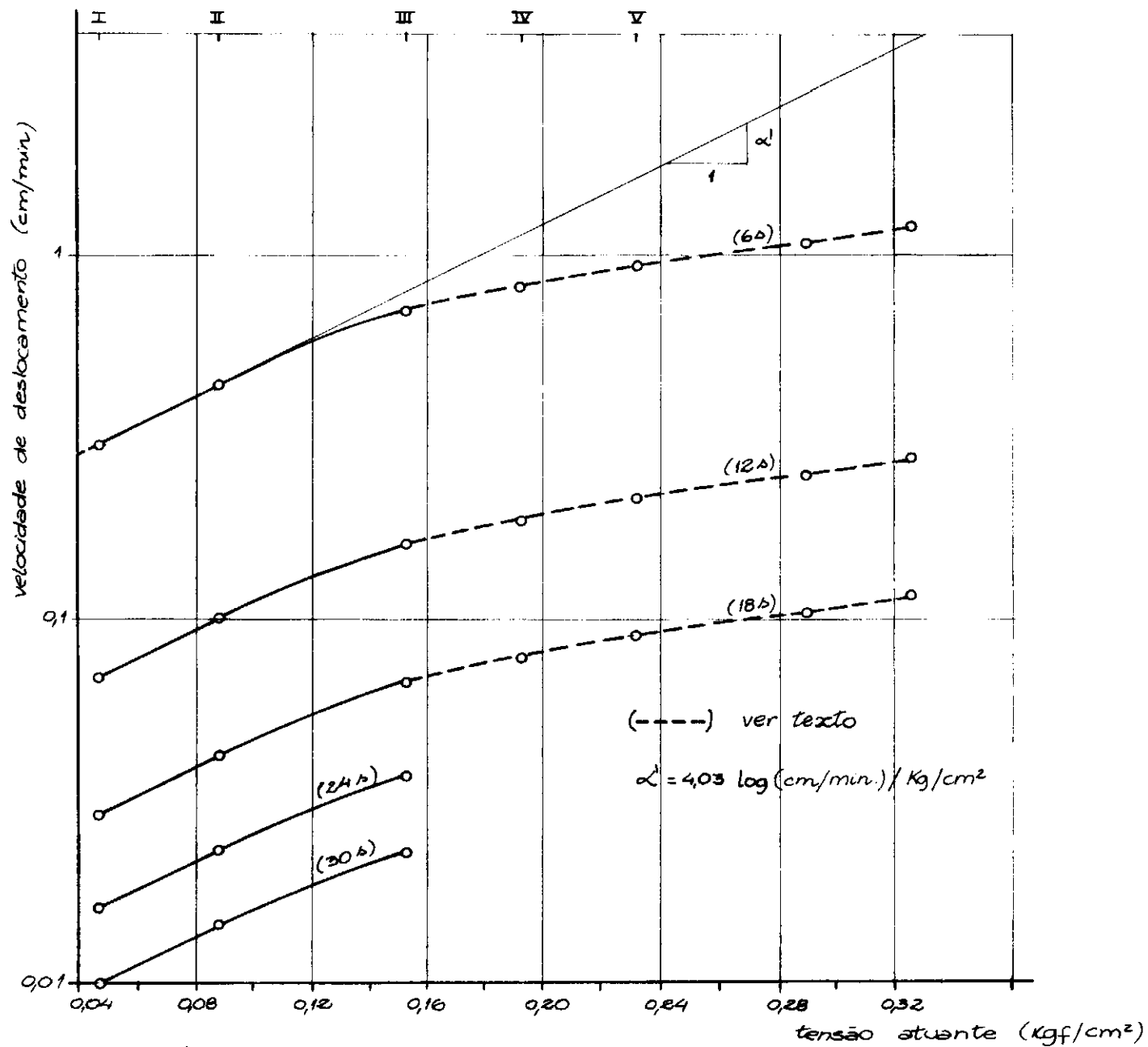


FIG. V.81 TIRANTE S-3 TIPO I



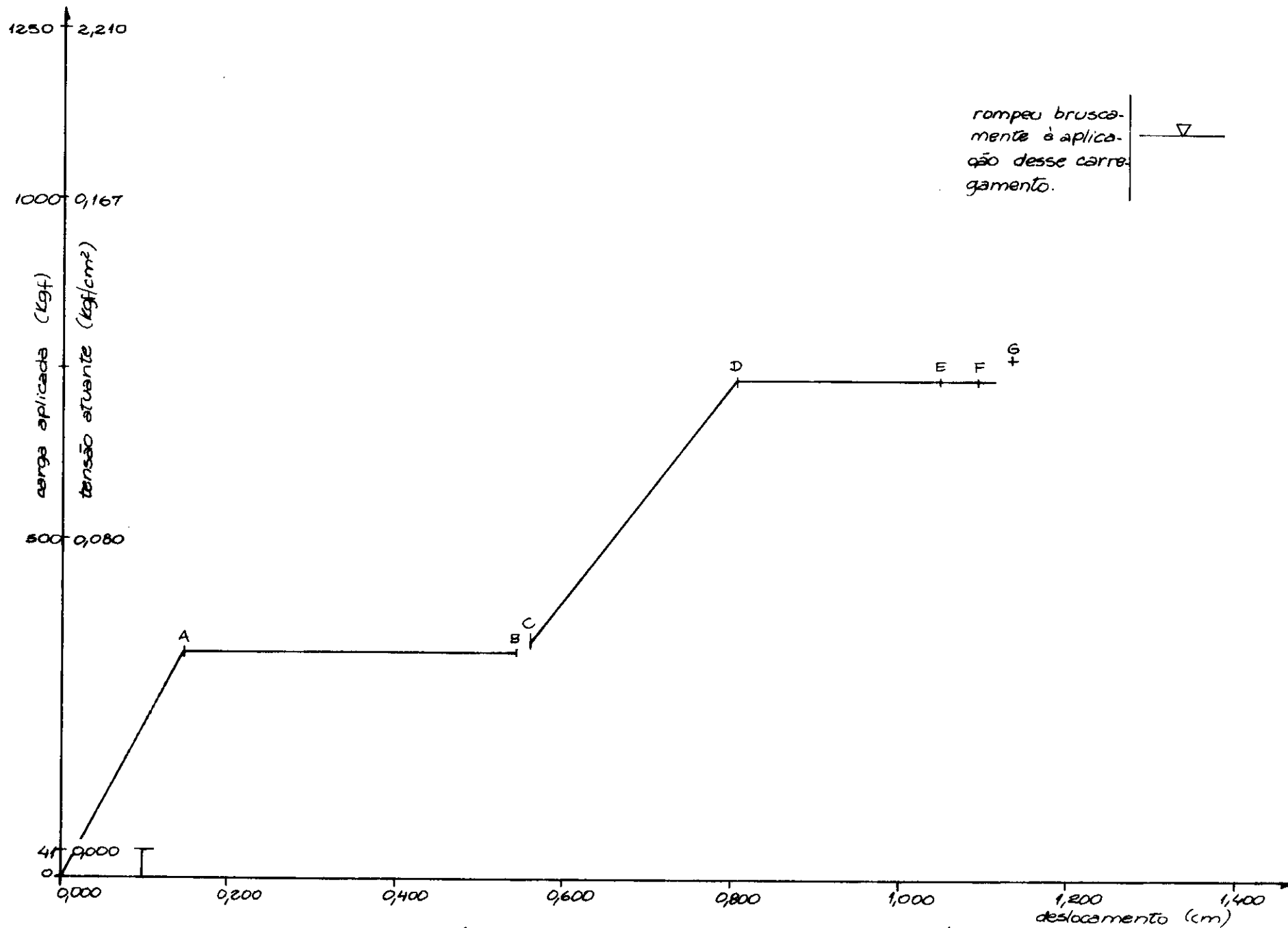


FIG. T.82 TIRANTE S-4 TIPO II (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO)

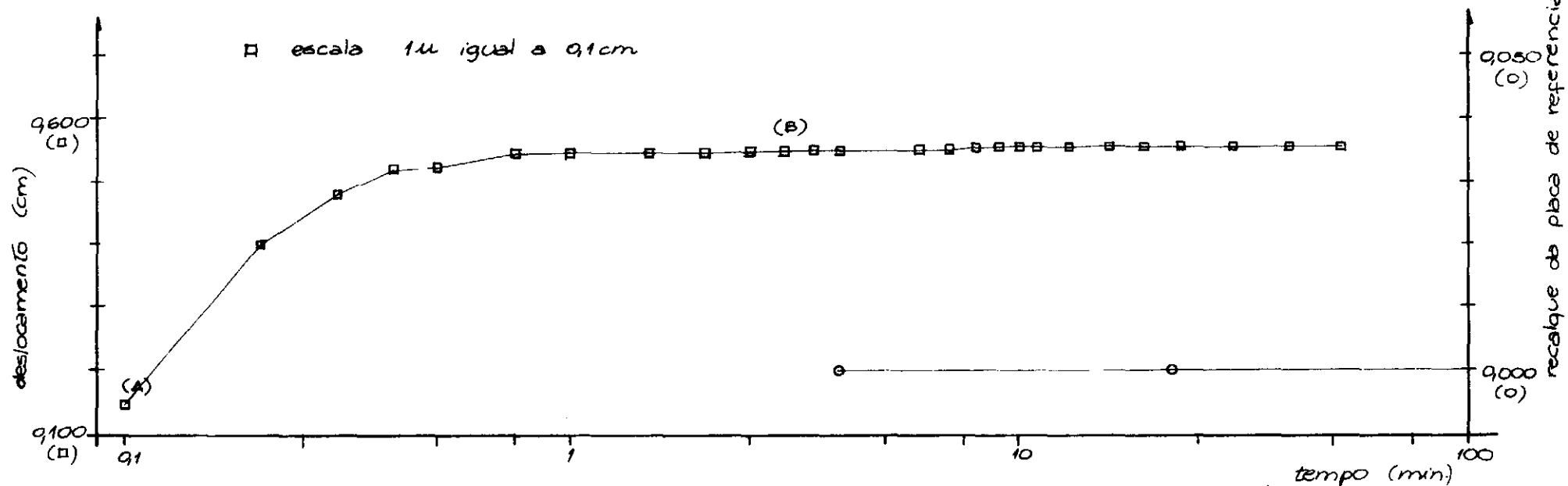
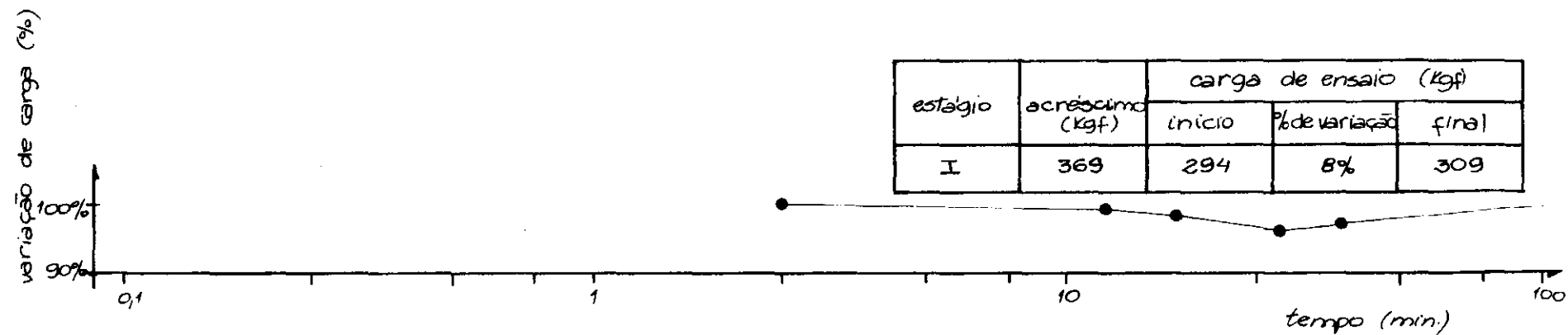


FIG. T.83a TIRANTE 5-4 TIPO II (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO I)

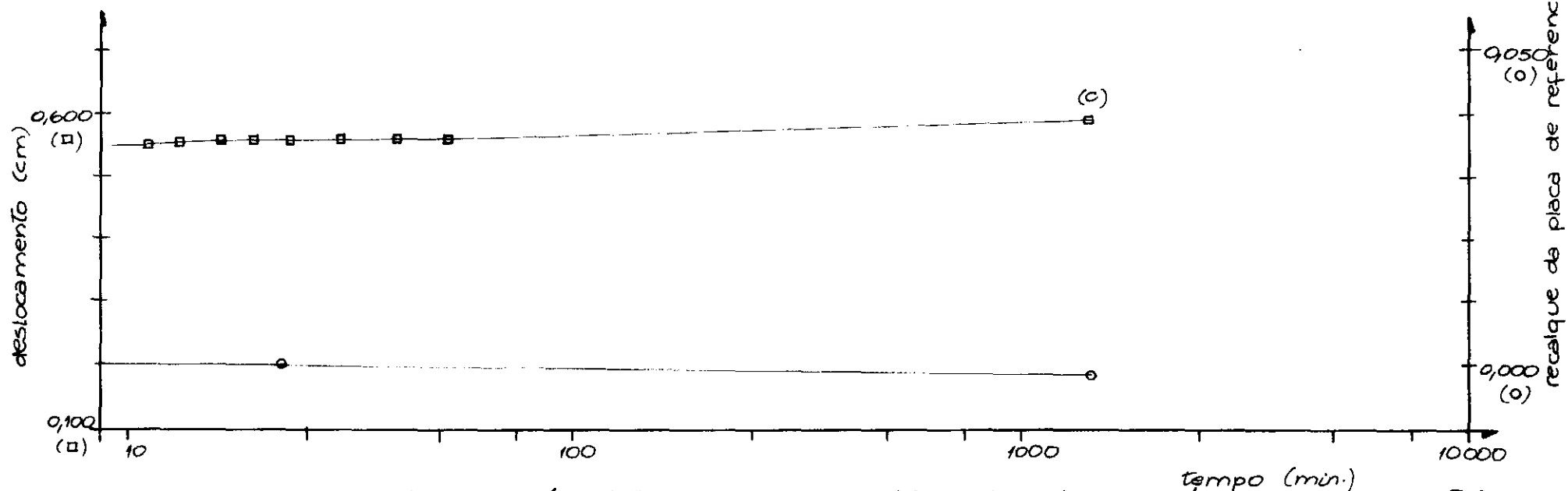
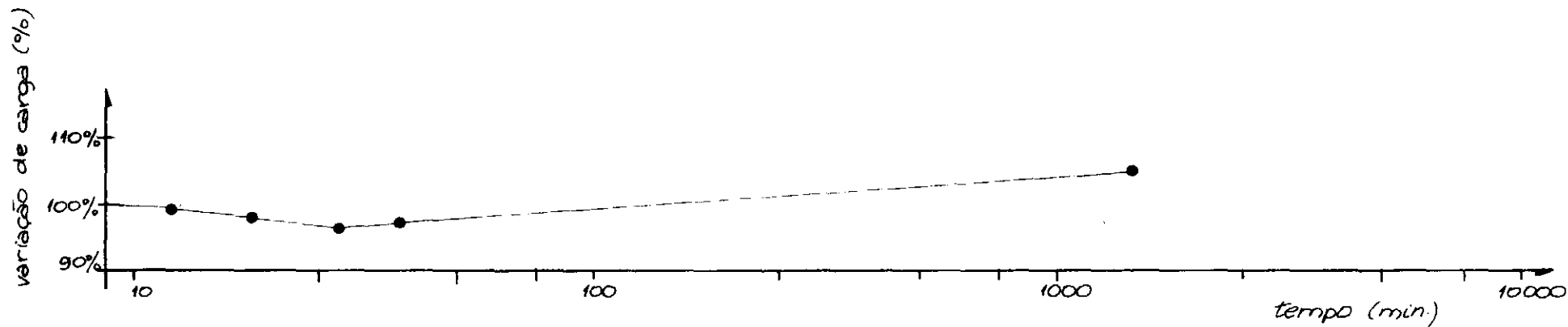


FIG. V.83 b TIRANTE S-4 TIPO II (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO I, CONTINUAÇÃO).

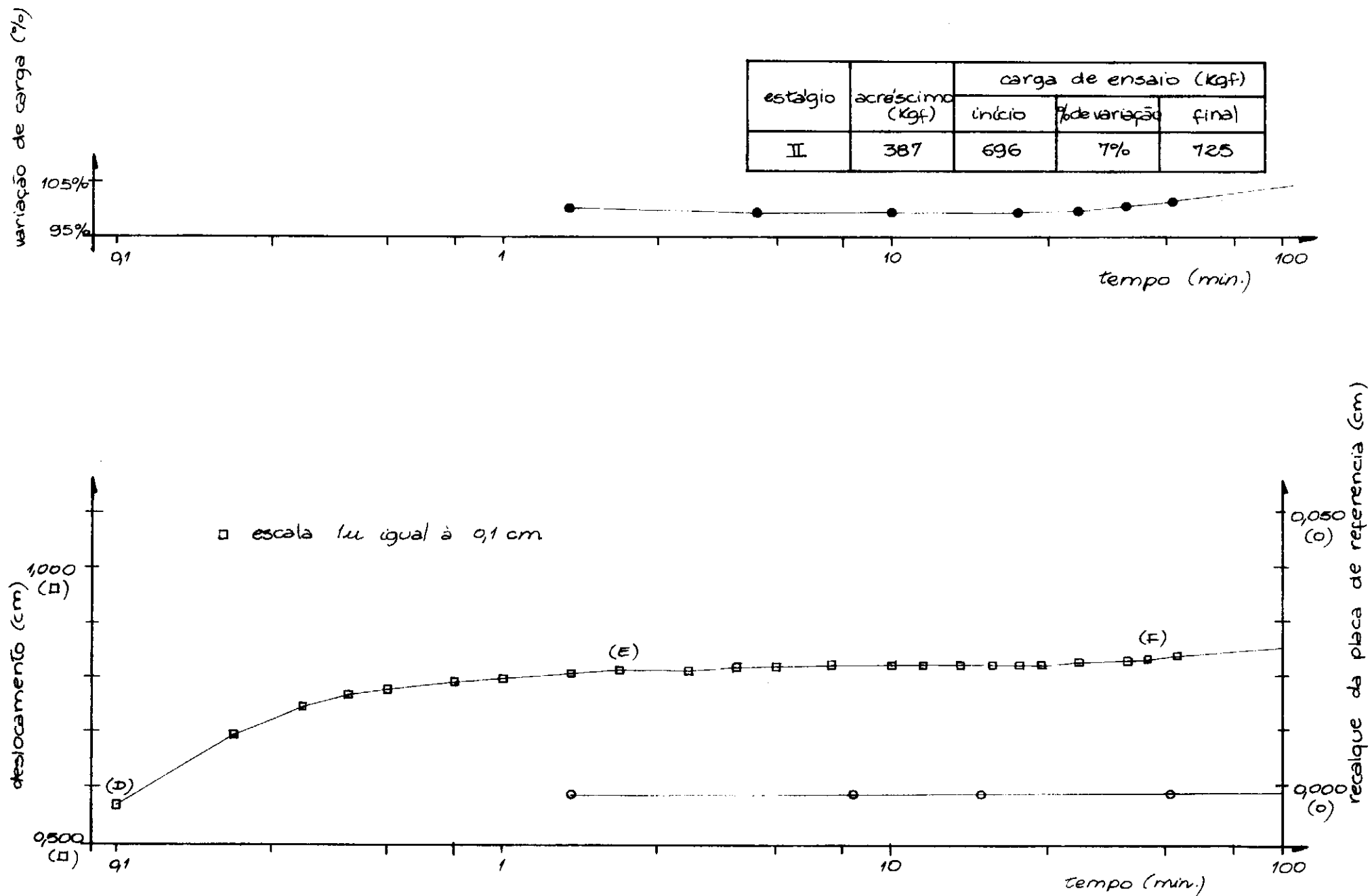


FIG. V. 84 a TIRANTE 5-4 TIPO II (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO II)

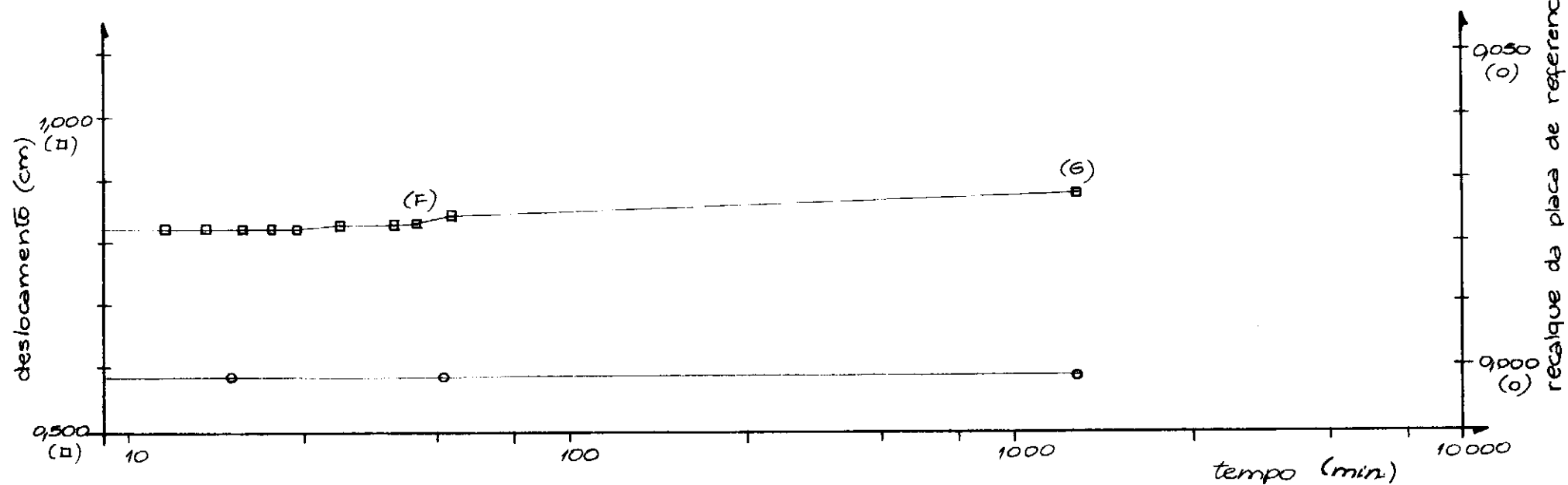
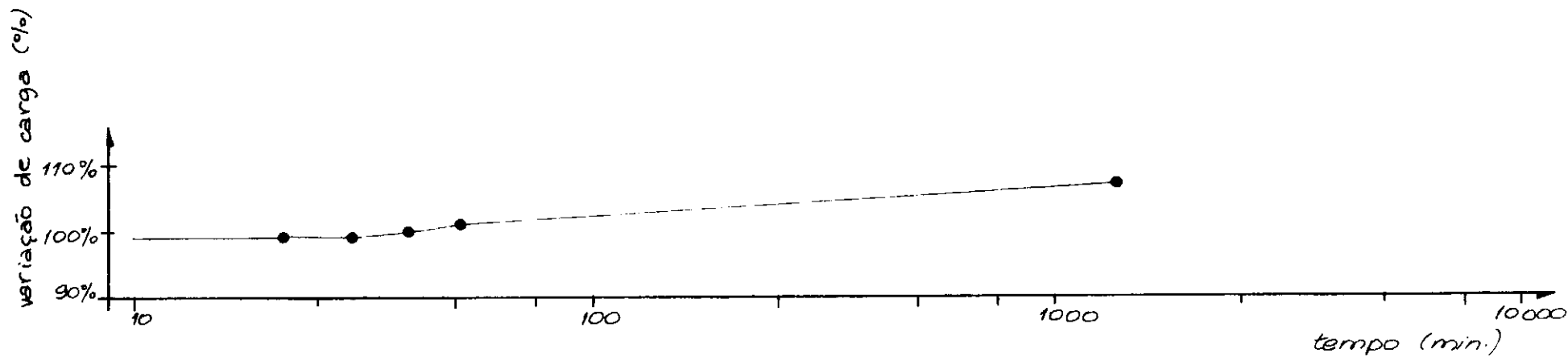


FIG. V. 84 b TIRANTE 34 TIPO II (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO - ESTÁGIO II, CONTINUAÇÃO)

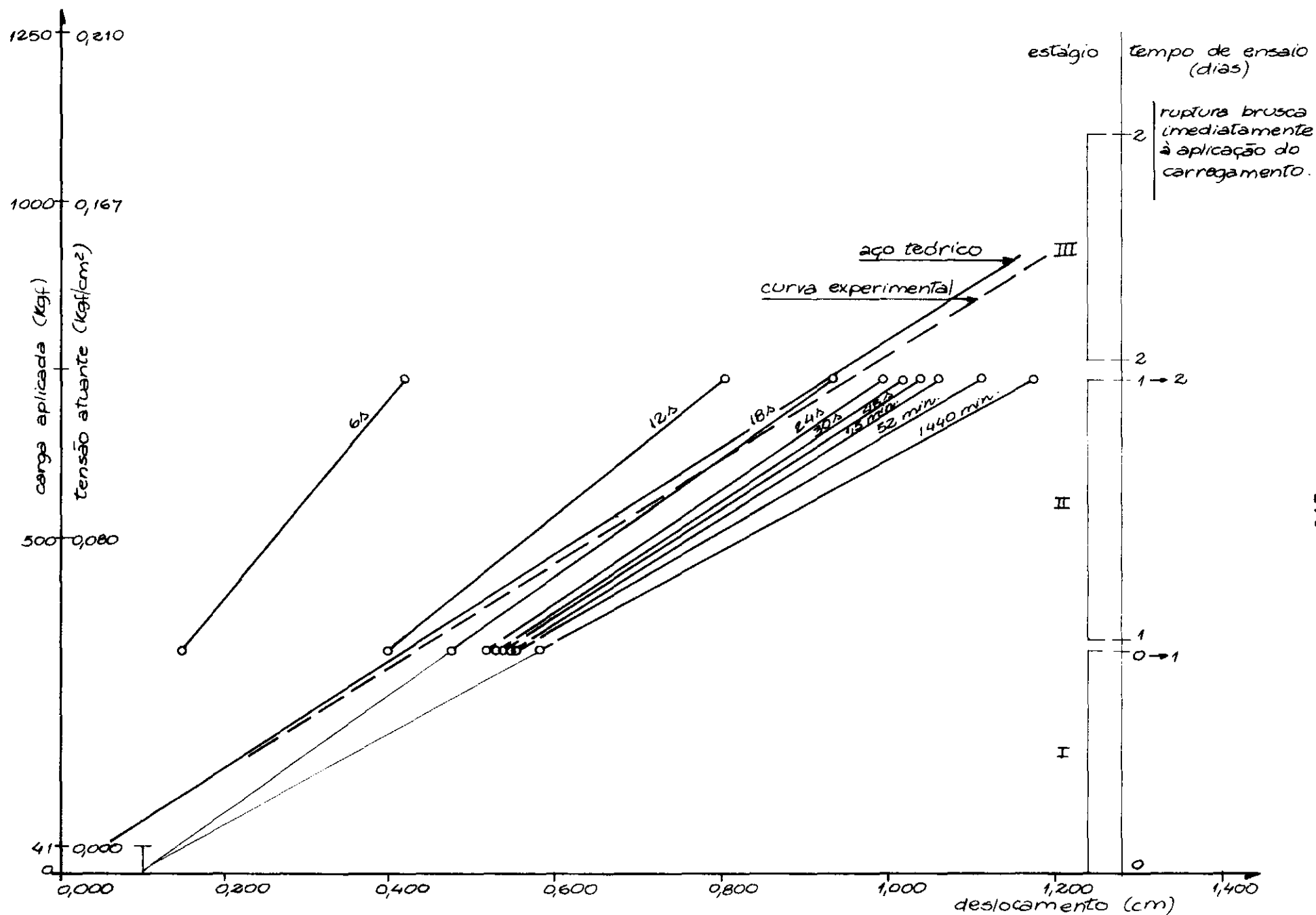


FIG. V.85 TIRANTE S-4 TIPO II (ENSAIO DE PRIMEIRO CARREGAMENTO)

| estágio | acrescimento<br>(kgf) | carga de<br>ensaio(kgf) |
|---------|-----------------------|-------------------------|
| A-1     | 325                   | 284                     |

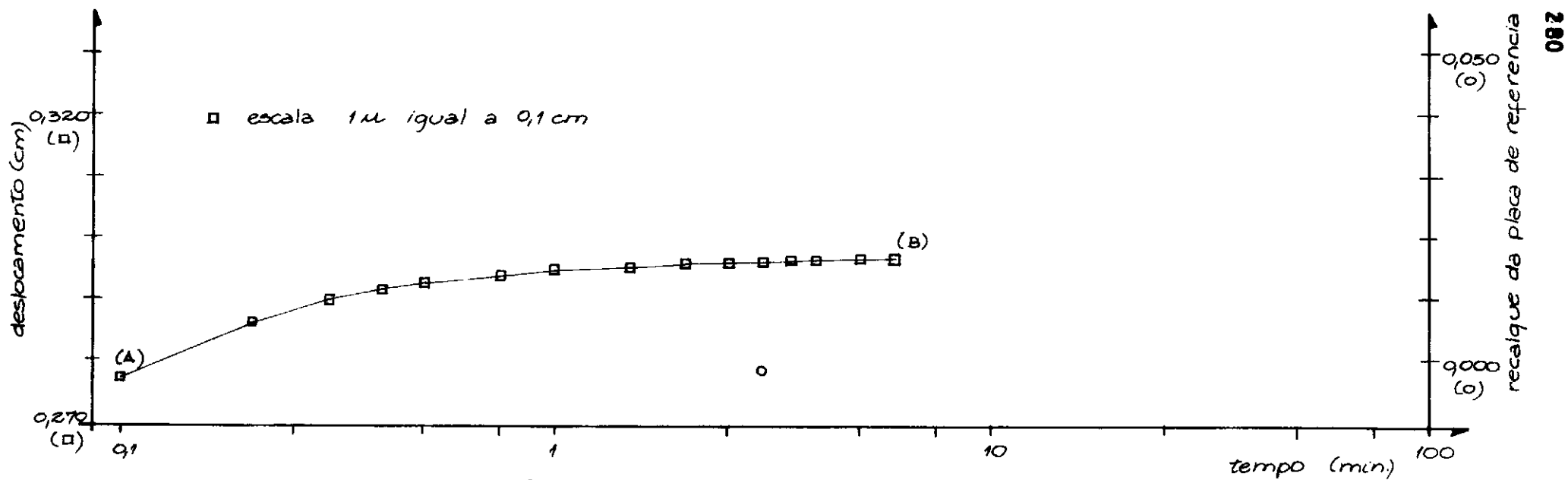


FIG. V. 86 TIRANTE S-4 TIPO II (ENSAIO DE RECARREGAMENTO A)

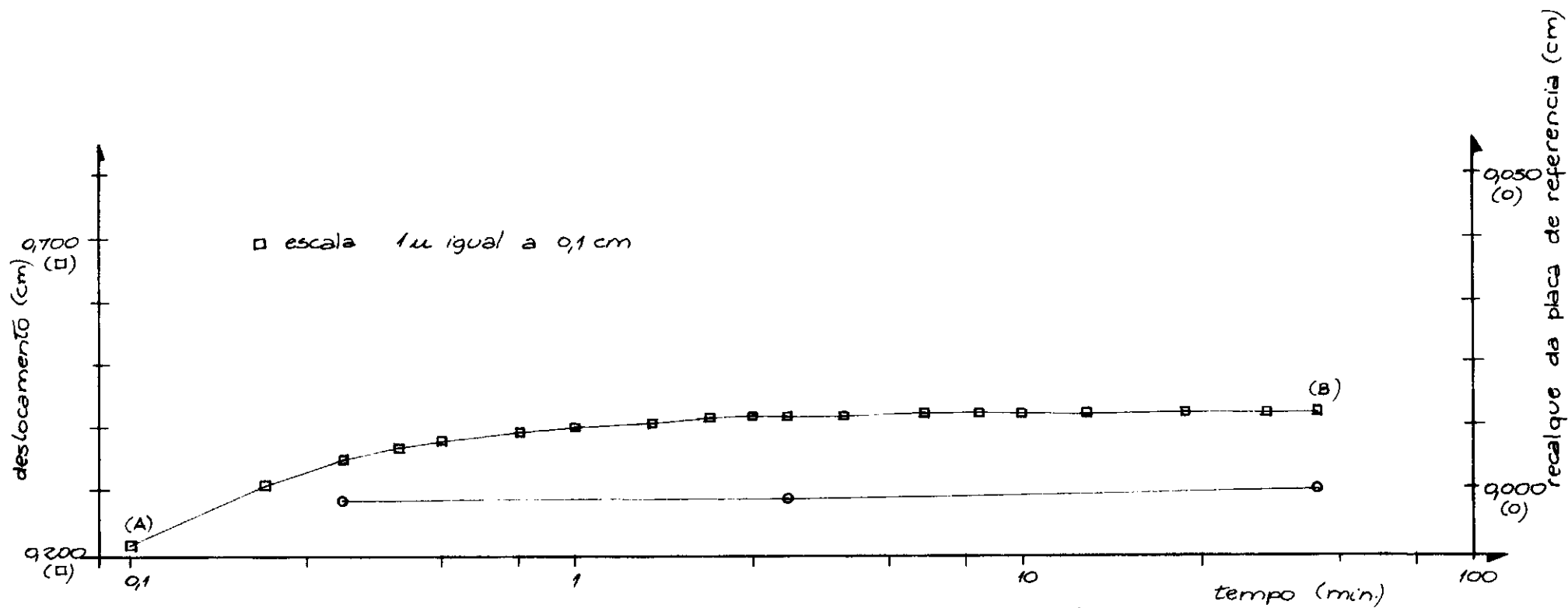
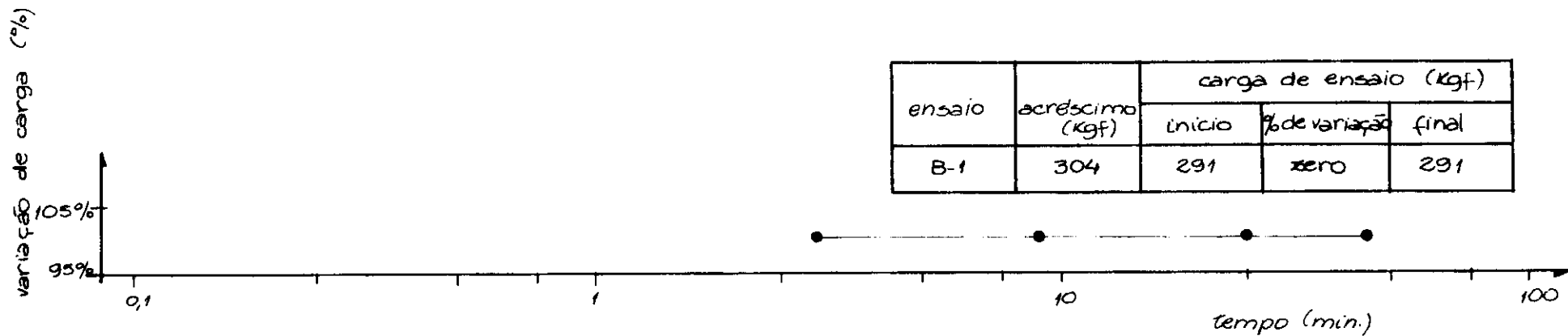


FIG. V. 87 TIRANTE 3-4 TIPO II (ENSAIO DE RECARREGAMENTO B-1)



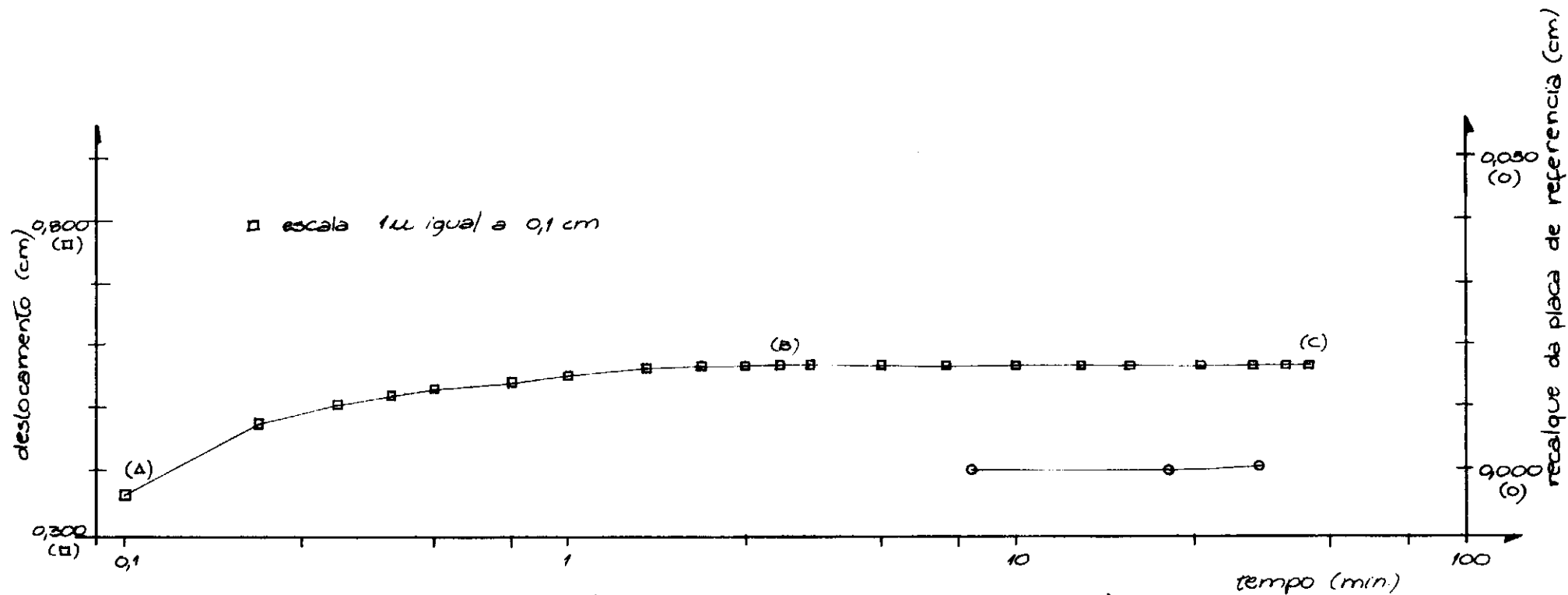
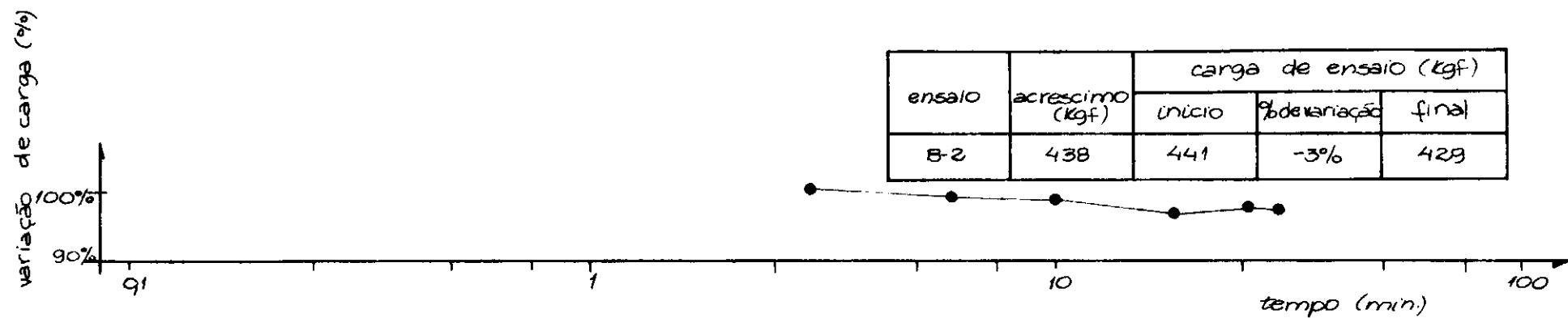


FIG. V.88 TIRANTE B-4 TIPO II (ENSAIO DE RECARREGAMENTO B-2)

| ensaio | acréscimo (kgf) | carga de ensaio (kgf) |
|--------|-----------------|-----------------------|
| B-3    | 554             | 548                   |

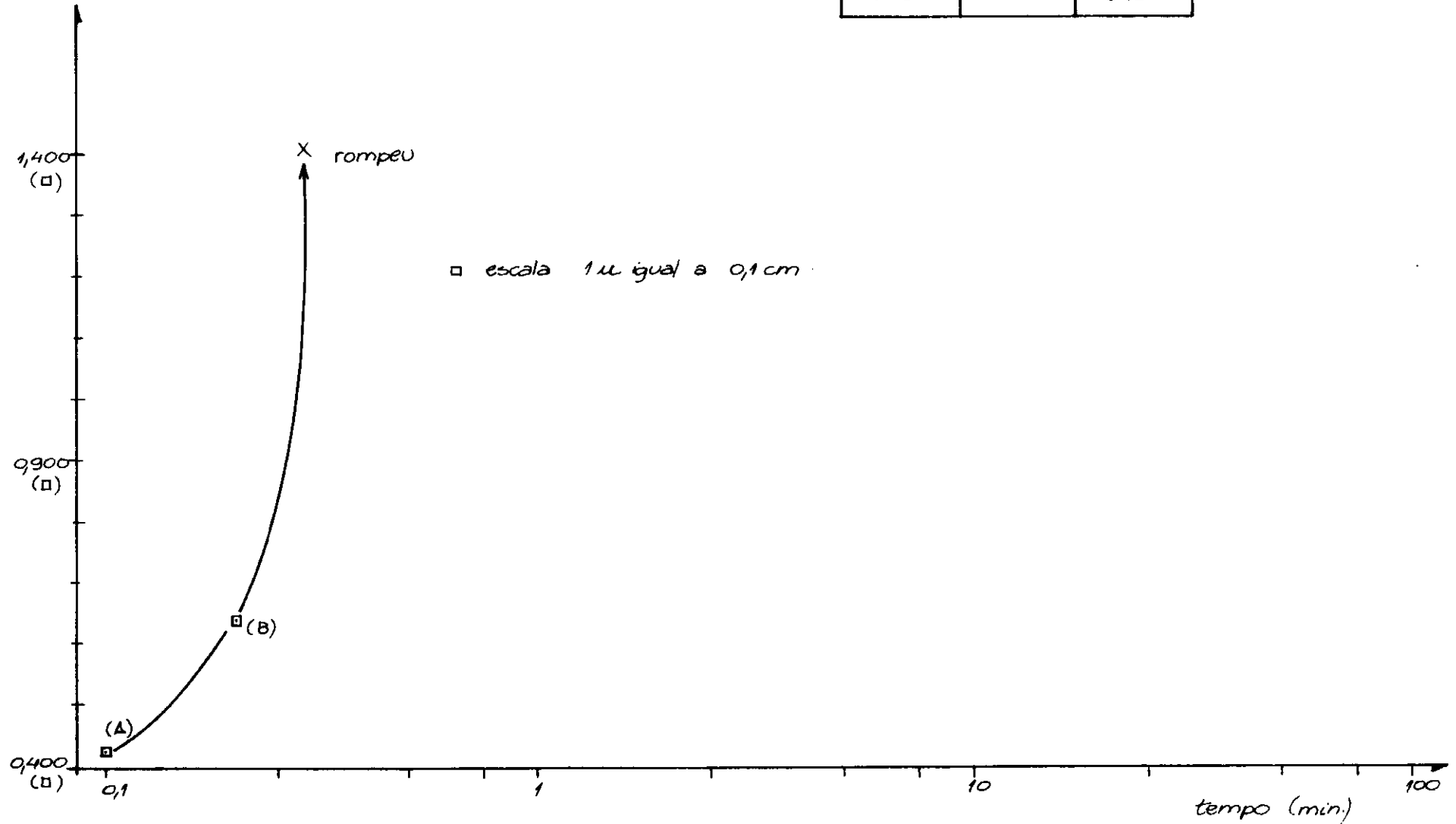


FIG. V.89 TIRANTE S-4 TIPO II (ENSAIO DE RECARREGAMENTO B-3)

| ensaio | acréscimo (kgf) | carga de ensaio (kgf) |
|--------|-----------------|-----------------------|
| B-4    | 506             | 510                   |

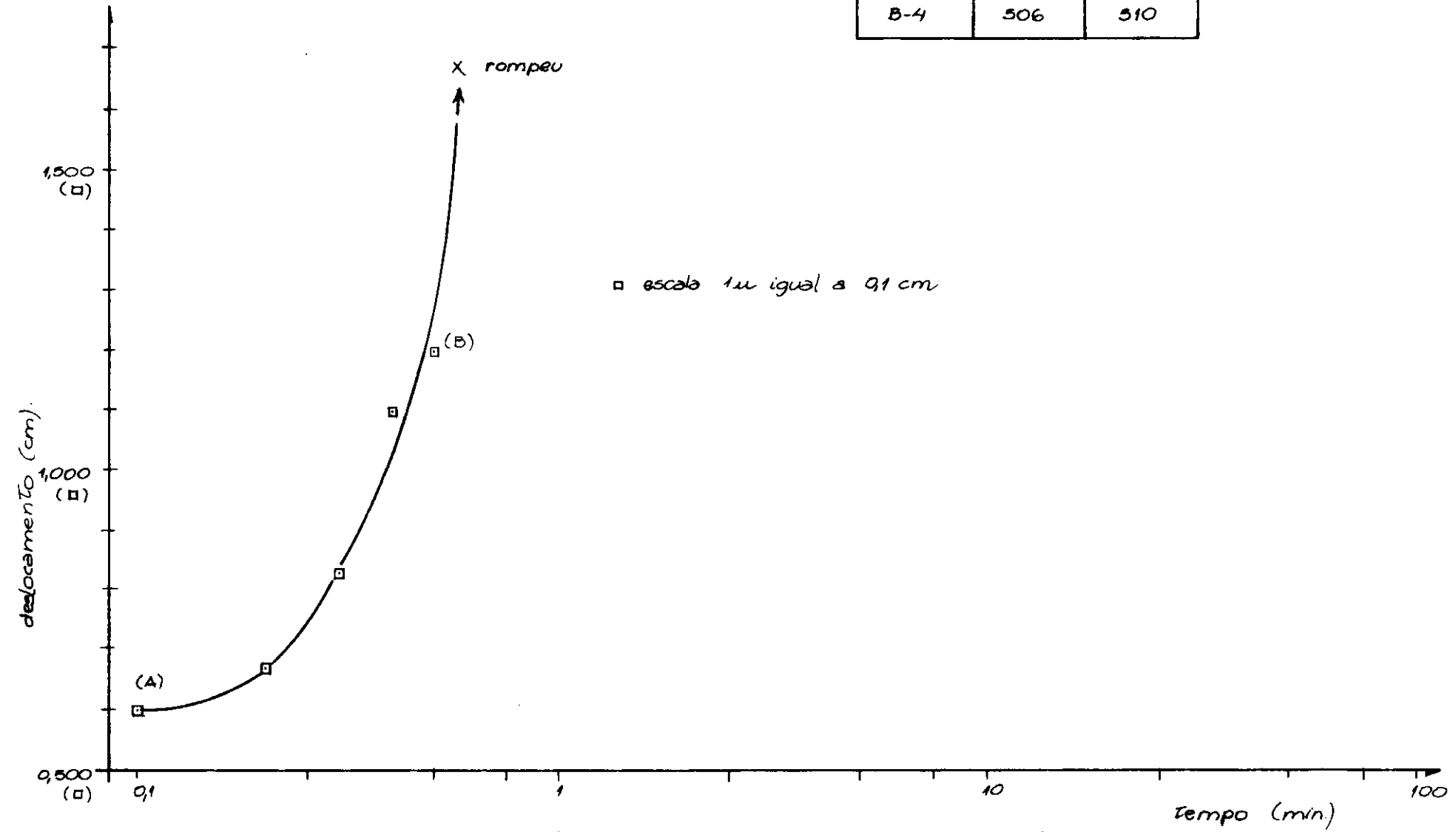


FIG. V.90 TIRANTE S-4 TIPO II (ENSAIO DE RECARREGAMENTO B-4)

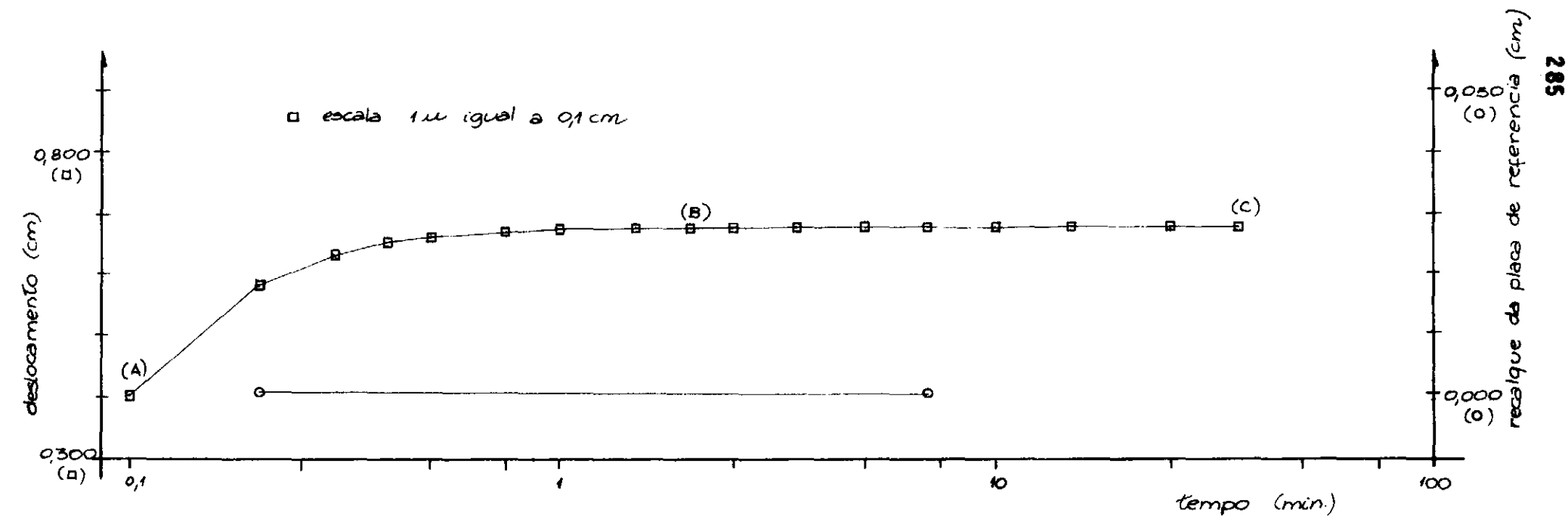
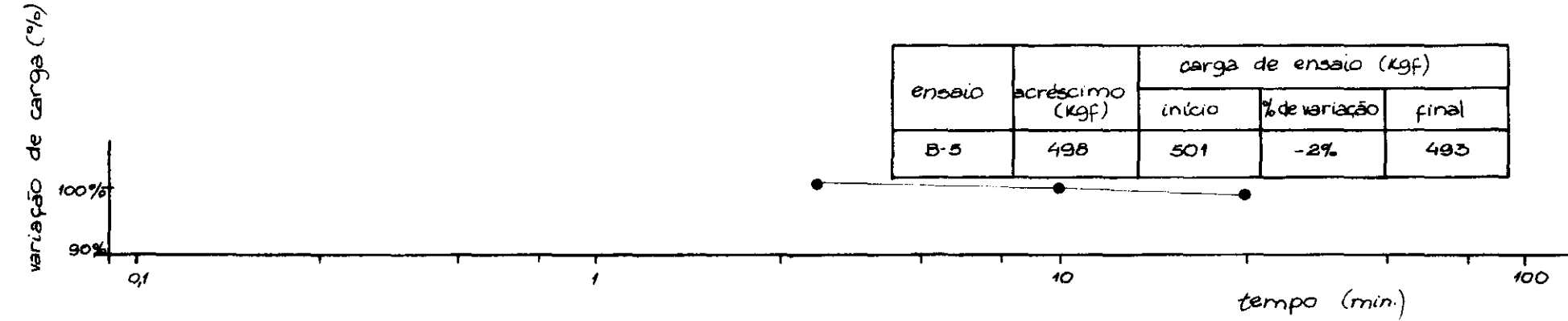


FIG. V.91 TIRANTE S-4 TIPO II (ENSAIO DE RECARREGAMENTO B-5)

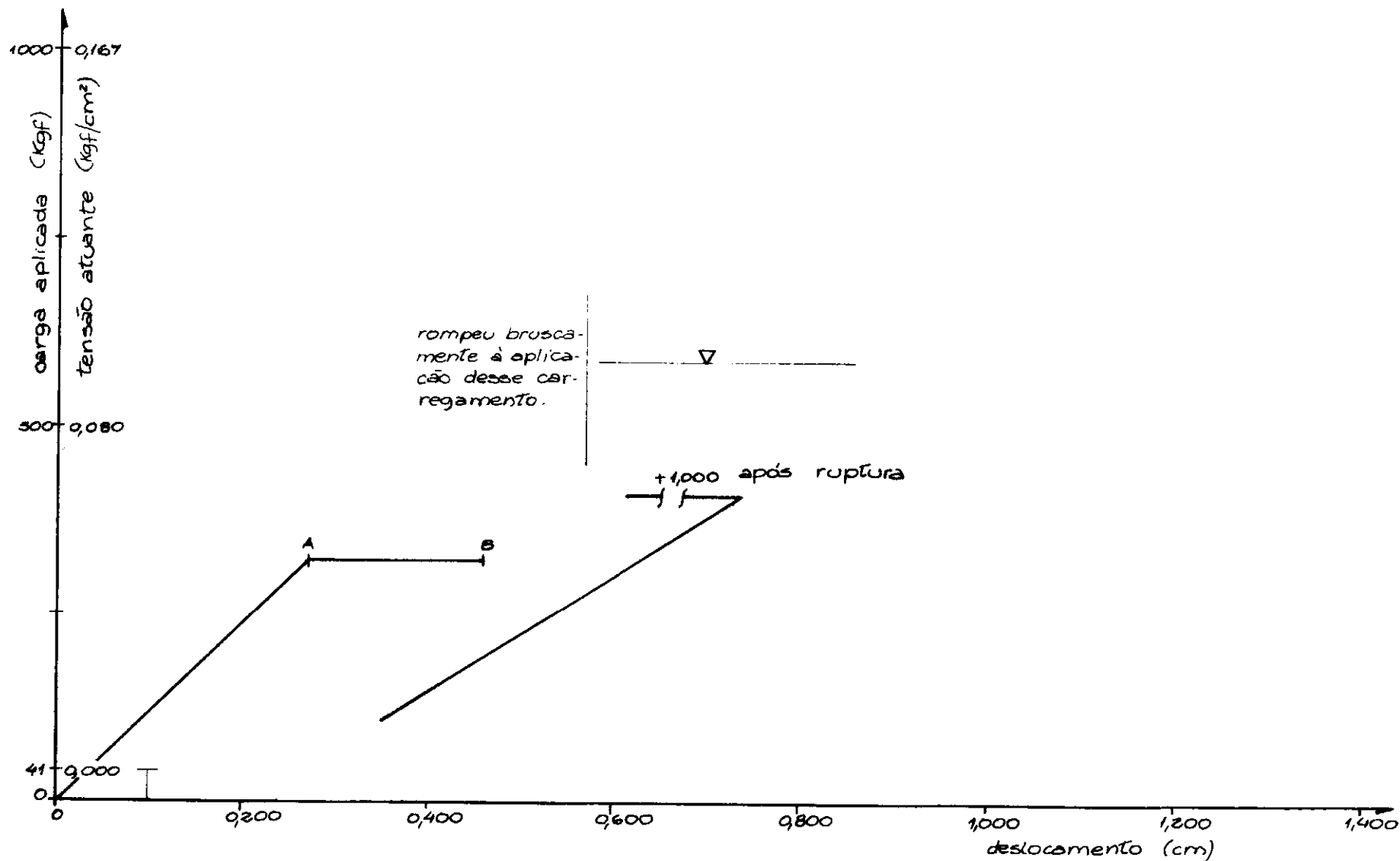


FIG. V.92 TIRANTE S-4 TIPO II (ENSAIO DE RECARREGAMENTO A)

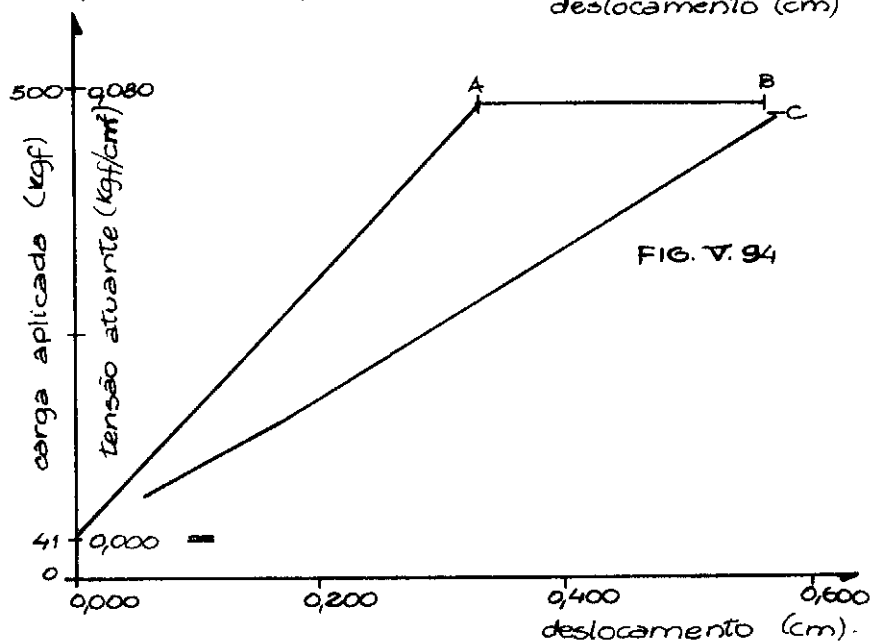
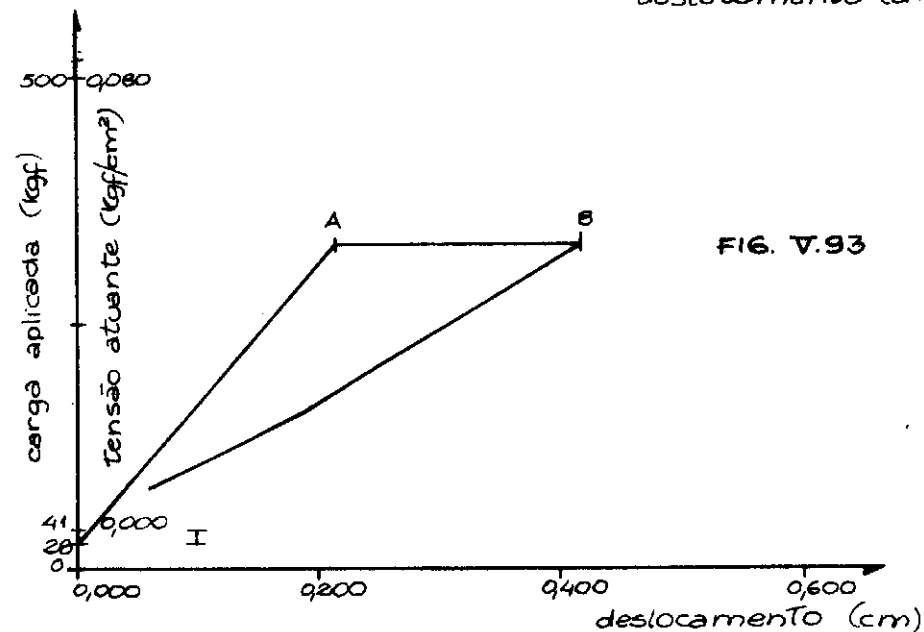
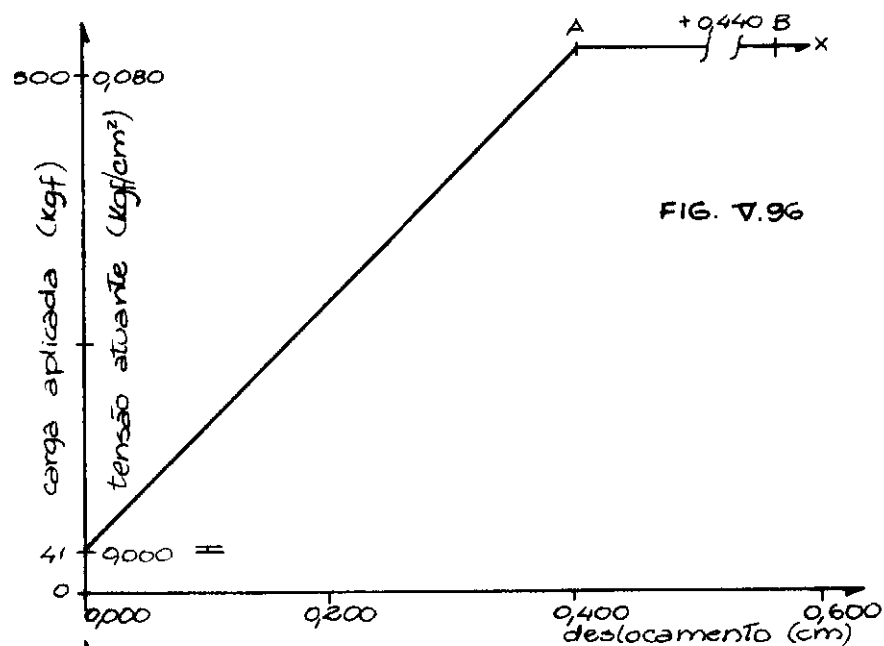
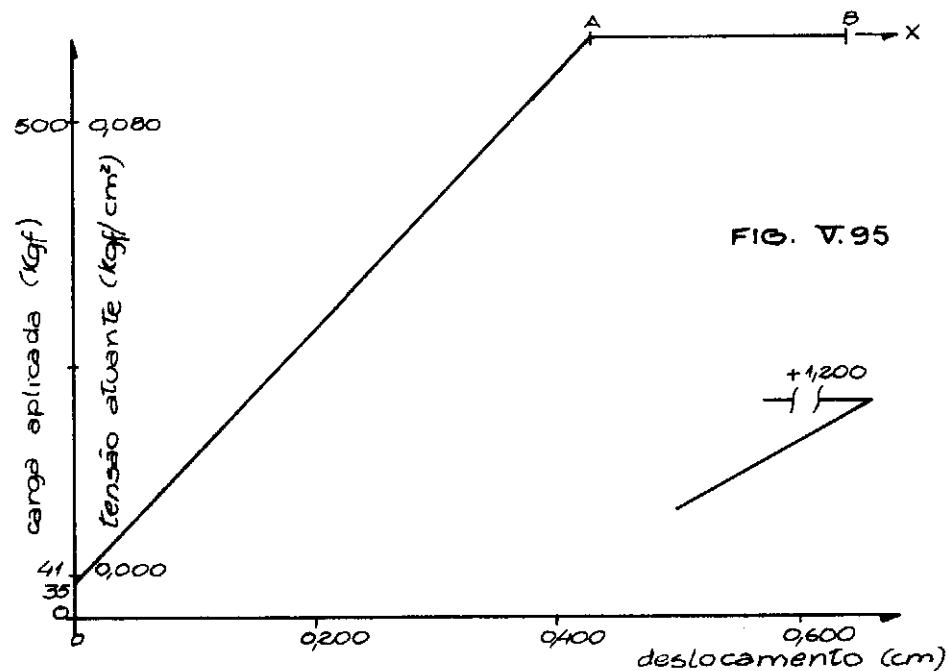


FIG. V. 93 , V.94 , V.95 E V.96 TIRANTE 3-4 TIPO II (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO B-1 , B-2 , B-3 E B-4 , RESPECTIVAMENTE)

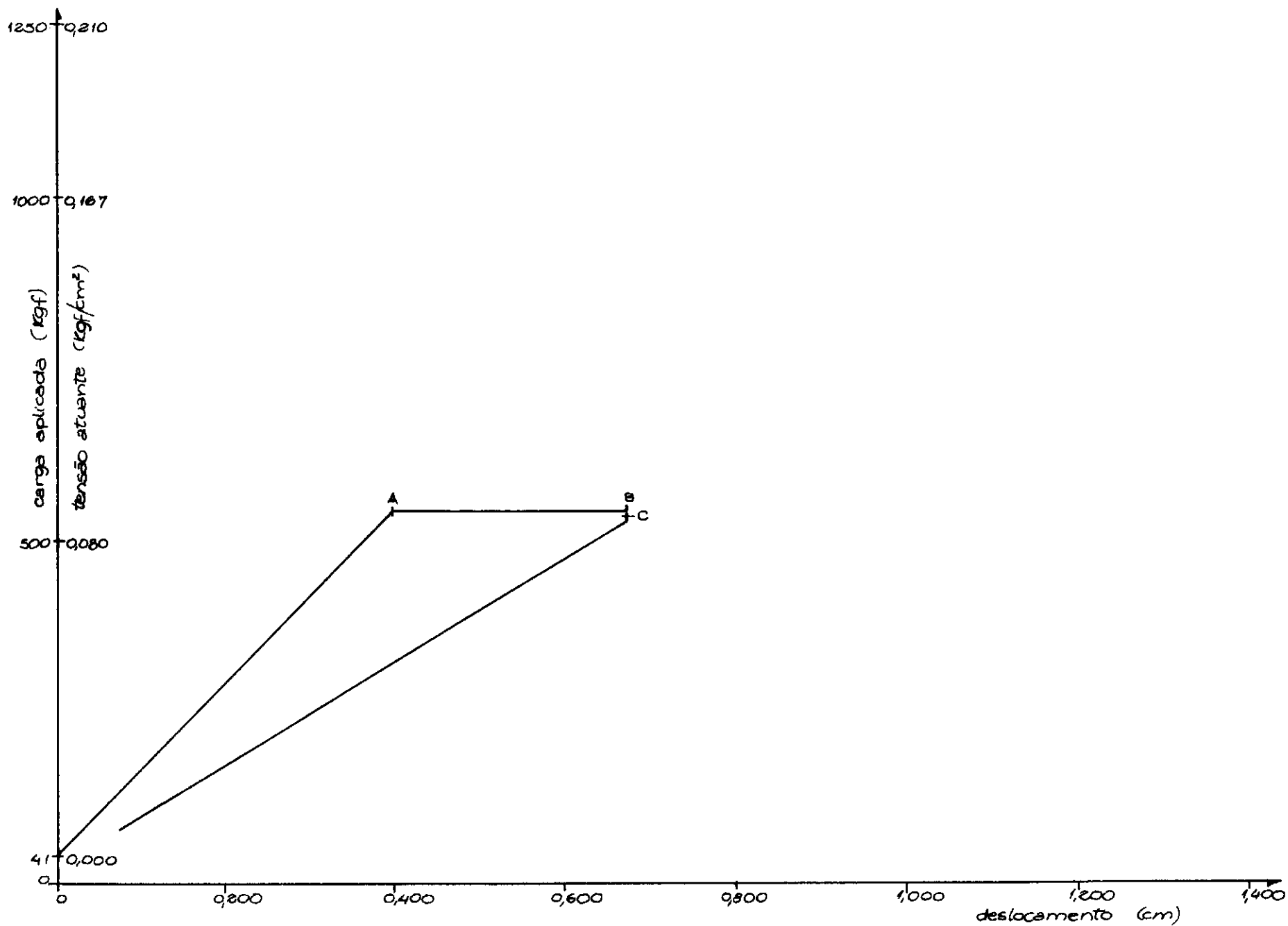


FIG. V. 97 TIRANTE S-4 TIPO I (ENSAIO DE RECARREGAMENTO B-5)

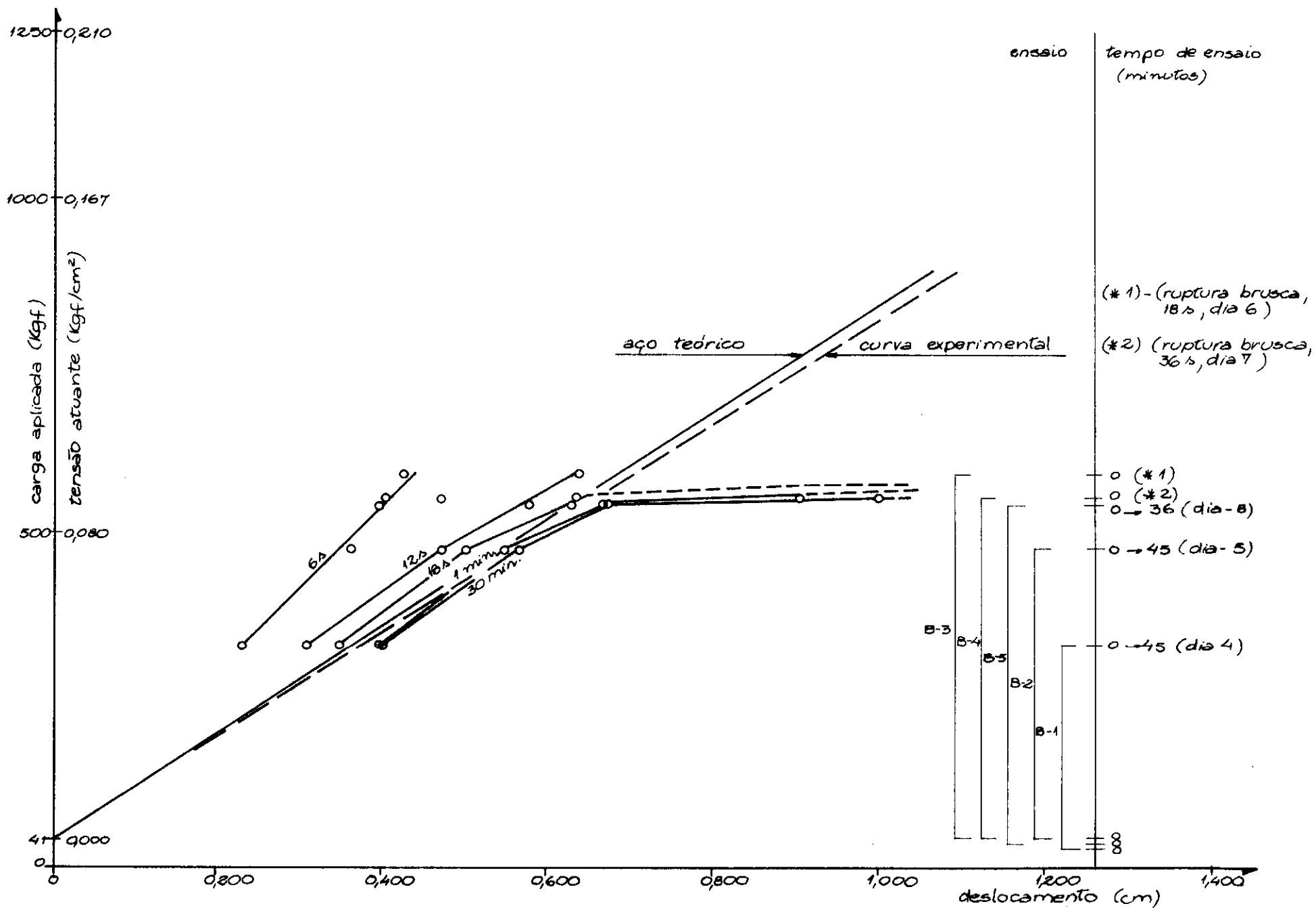


FIG. V. 98 TIRANTE S-4 TIPO II (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO)



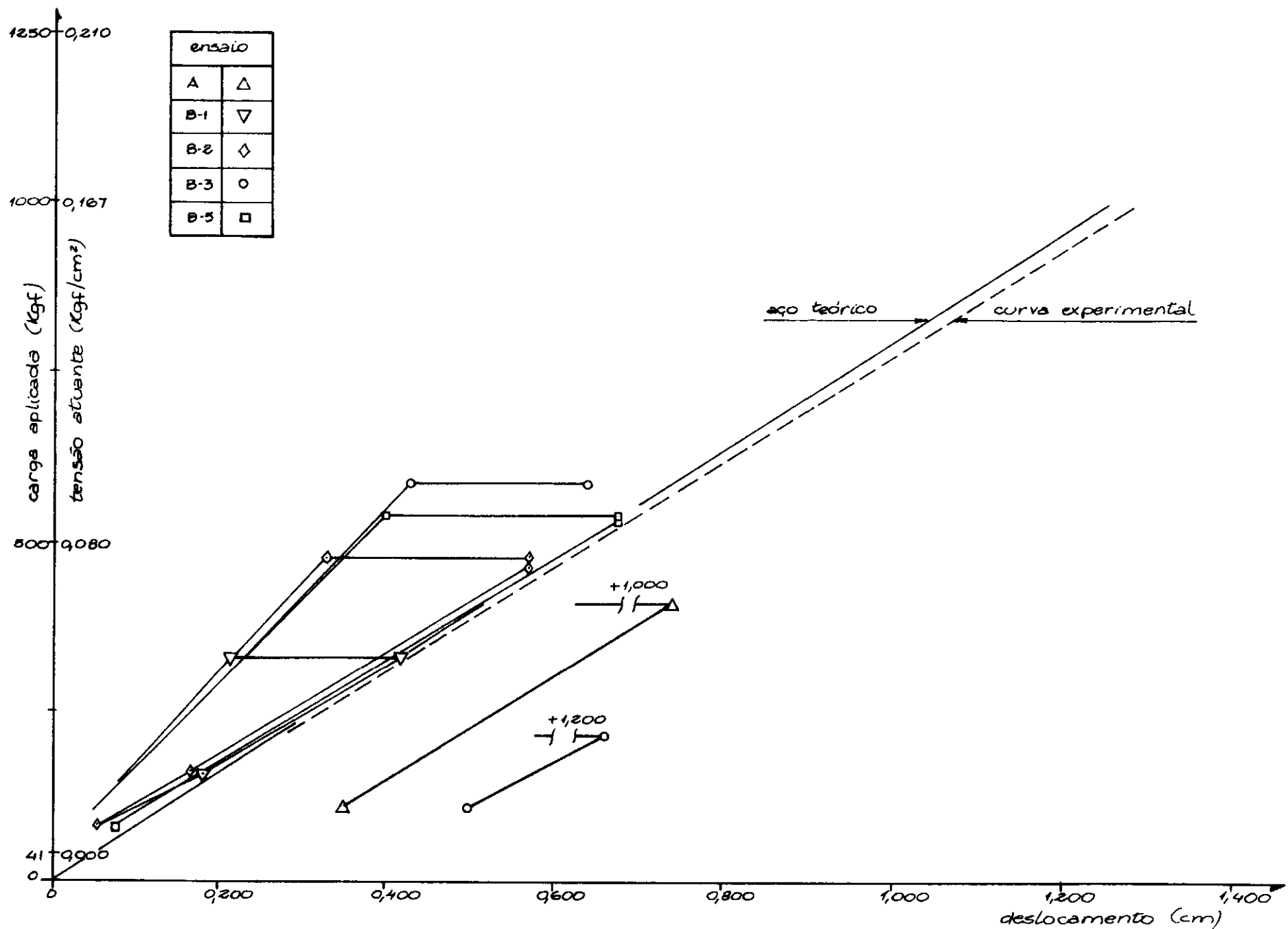


FIG. V. 99 TIRANTE S-4 TIPO II

| estágio | acréscimo<br>(kgf) | carga de ensaio (kgf) |               |       |
|---------|--------------------|-----------------------|---------------|-------|
|         |                    | início                | % de variação | final |
| I       | 369                | 294                   | 8%            | 309   |
| II      | 387                | 696                   | 7%            | 725   |

OBS.:

Descontado o alongamento do aço.

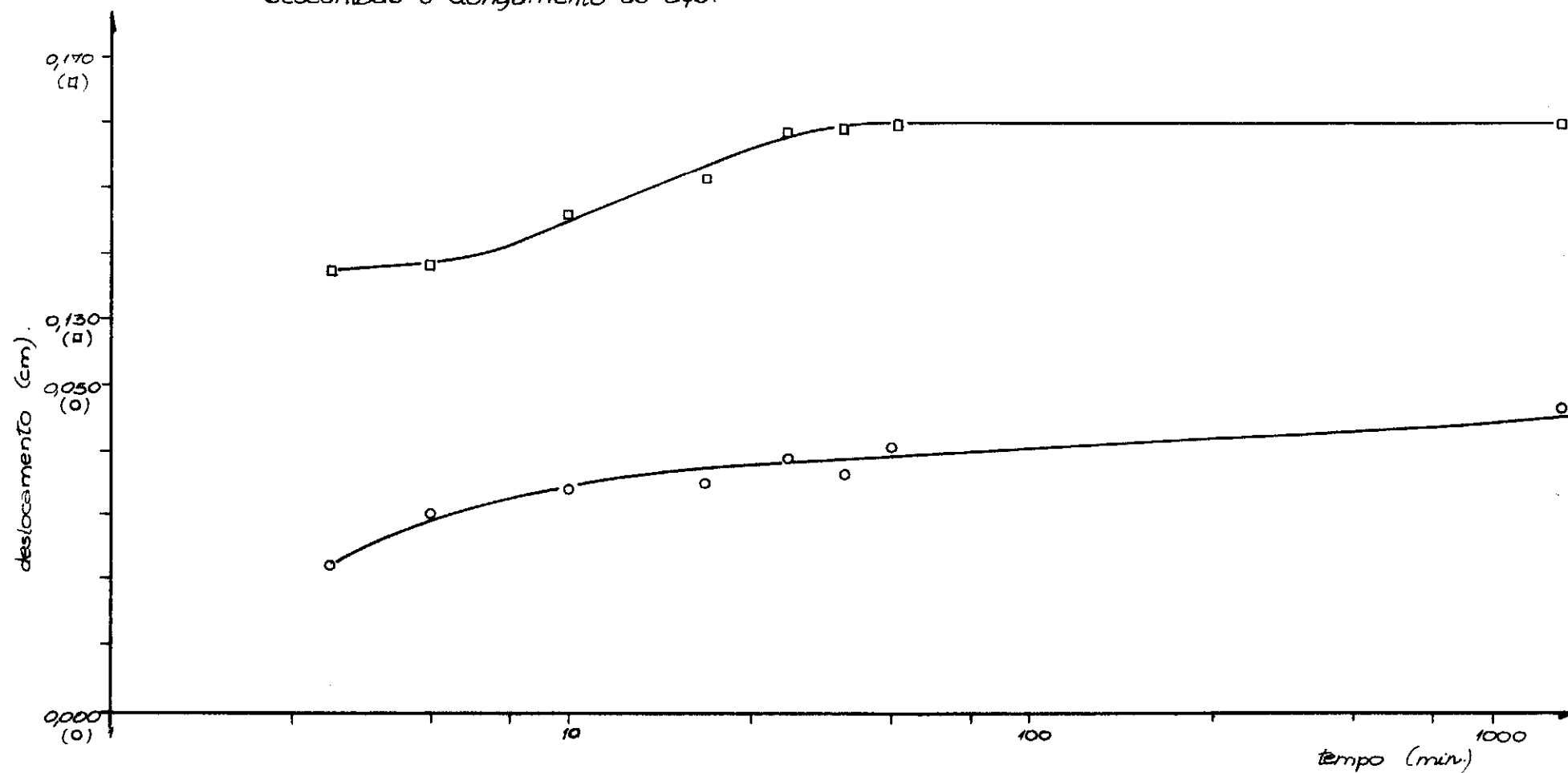


FIG. V. 100 TIRANTE S-4 TIPO II (ENSAIOS DE PRIMEIRO CARREGAMENTO)

| ensaio  | acréscimo<br>(kgf) | carga de ensaio (kgf) |               |       |
|---------|--------------------|-----------------------|---------------|-------|
|         |                    | início                | % de variação | final |
| B-1 (O) | 304                | 291                   | zero          | 291   |
| B-2 (◊) | 438                | 441                   | -3%           | 429   |
| B-3 (□) | 498                | 501                   | -2%           | 493   |

Obs.:

1) Descontado o alongamento do aço

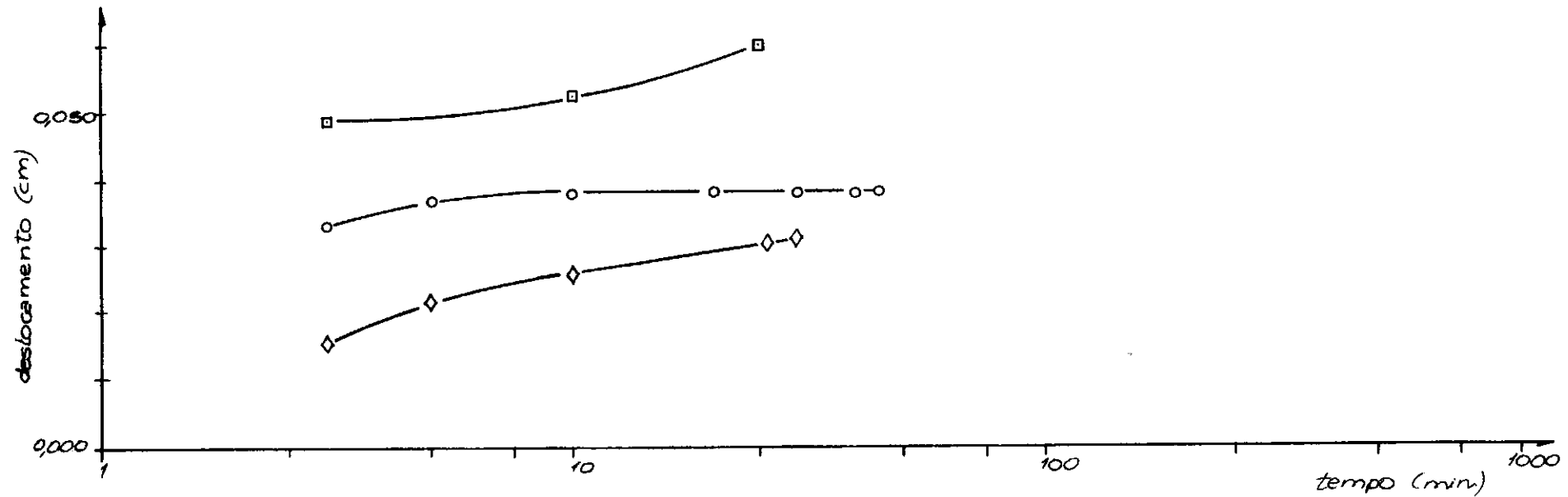


FIG. V. 101 TIRANTE 3-4 TIPO II (ENSAIOS DE RECARREGAMENTO)

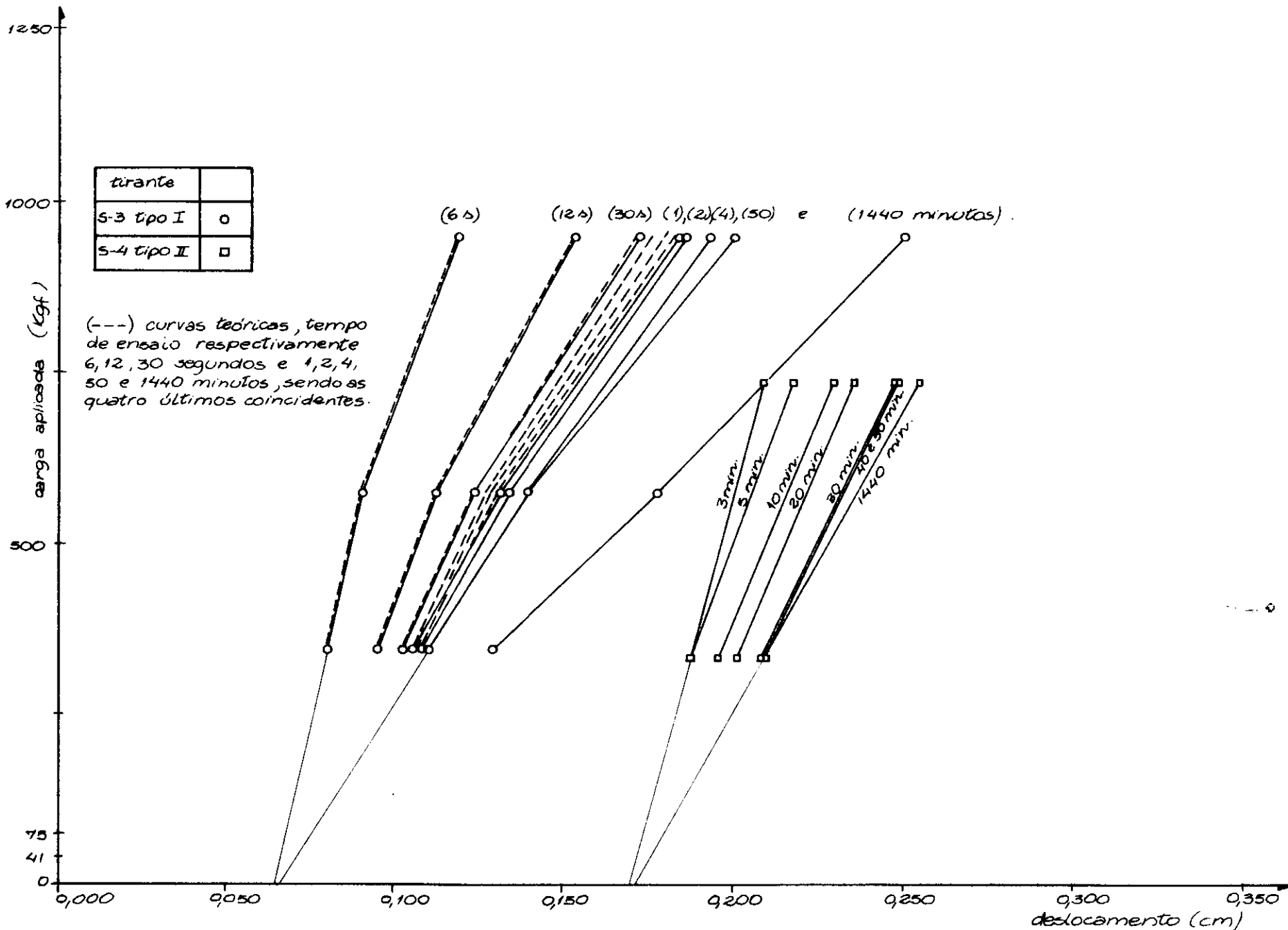


FIG. V.102 TIRANTES S-3 TIPO I E S-4 TIPO II (ENSAIOS DE PRIMEIRO CARREGAMENTO)

## CAPÍTULO VI

### COMENTÁRIOS SOBRE A INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO ESPECÍFICA DE TENSÕES NO COMPORTAMENTO DE TIRANTES

#### VI.1 INTRODUÇÃO

São apresentadas nesta seção várias hipóteses visando a análise da influência da distribuição específica de tensões no comportamento tempo-tensão-deslocamento e capacidade de carga de tirantes.

#### VI.2 CAPACIDADE DE CARGA

Uma distribuição irregular de tensões ao longo do fuste de um tirante ocasiona conseqüentemente, no caso do material envolvente ser homogêneo, diferentes níveis de tensões ao longo do seu comprimento.

No caso de um tirante, cujo carregamento seja tal

que o deslocamento em cada ponto do fuste seja inferior ao correspondente à ruptura, ter-se-á consequentemente uma distribuição de tensões cisalhantes ao longo do bulbo crescente com o deslocamento, que é superior no topo relativamente à base, à semelhança da distribuição calculada pela expressão (III.3), Figura III.31, para os tirantes tipo II. Acredita-se que nestas condições a distribuição calculada pela expressão (III.3) qualitativamente seja bem representativa, visto que a única hipótese simplificadora adotada na dedução desta expressão foi a linearidade entre tensões e deformações, razoável para grande parcela de solos a níveis de tensões afastados da ruptura.

Com o crescimento do valor do carregamento, chegar-se-á a uma situação na qual o deslocamento do topo do bulbo, superior aos demais, será igualado ao correspondente à máxima tensão cisalhante capaz de ser resistida pelo solo circunvizinho, isto é, atingir-se-á a ruptura nesse ponto do fuste do tirante, a qual dependendo da característica resistência ao cisalhamento-deslocamento do solo, poderá representar ou não uma queda de resistência no local.

Como apresentado anteriormente, para o material encontrado na cota do bulbo do tirante em estudo (entre 12 e 14 metros de profundidade) em ensaios (UU) de laboratório em amostras indeformadas foi constatada esta queda de resistência, Figuras III.11 à III.15, tendo o valor da sensibilidade se situado entre os valores 1,7 e 3,3, Figura III.17.

Com a queda de resistência no ponto, uma parcela da tensão resistida no local, transfere-se para regiões vizinhas abaixo, continuando este processo progressivamente caso também se atinja a ruptura nestas novas regiões. Entretanto, o processo poderá estabilizar-se, se o somatório das forças resistentes oriundas das tensões atuantes em todas as faixas do fuste, nas quais se tenha ou não atingido a ruptura, for superior ao carregamento aplicado.

O processo acima de ruptura progressiva faz com que o valor do carregamento necessário para provocar a ruptura seja inferior ao correspondente àquele no qual a distribuição de tensões é uniforme, pois a uniformidade de tensões permite que uma maior parcela de resistência seja mobilizada simultaneamente. O desempenho dos tirantes tipo I (rígido) e tipo II (flexível) esteve de acordo com estas considerações, o valor da capacidade de carga dos tirantes S-4 tipo II no ensaio de primeiro carregamento foi de 1061 Kgf, representando 80% do valor do ensaio semelhantemente executado no tirante S-5 tipo I (ver item V.4.4).

Atingida a ruptura generalizada do tirante, na qual um grande deslocamento se faz sentir, todos os pontos entram em ruptura e, portanto, no caso de o solo envolvente perder resistência com o cisalhamento, o tirante passa a apresentar para os ensaios seguintes de recarregamento uma capacidade de carga inferior à original.

Esperava-se que o valor da capacidade de carga dos ensaios de recarregamento fosse semelhante para os ensaios nos tirantes tipo I e tipo II. Após a primeira ruptura, com o amolgamento, como é característica dos solos em geral (ver ensaios (UU) amolgados, Figuras III.11 a III.15) a resistência ao cisalhamento pode ser correlacionada por uma função sempre crescente com o deslocamento, tendendo à estabilização. Acredita-se que esta nova característica do solo impeça a ruptura progressiva da forma que foi descrita anteriormente. Entretanto, contrariamente ao esperado, foram diversos os valores obtidos em ensaio para a capacidade de carga ao recarregamento de ambos os tipos de tirantes. O valor da capacidade de carga do primeiro ensaio de recarregamento do tirante S-4 tipo II, 540 Kgf, representou 58% da carga do ensaio basicamente igual do tirante S-5 tipo I (ver item V.4.4).

Convém salientar que o comportamento citado acima para os solos após a primeira ruptura, só é válido, caso ocorra um amolgamento razoável do material.

### VI.3 COMPORTAMENTO TENSÃO-DESLOCAMENTO-TEMPO

Num tirante de bulbo flexível, tem-se que a distribuição mais irregular de tensões, gerada pelo carregamento inicial (ver item III.3) concorre com que sejam diversos os níveis de tensão do material de fundação ao longo do fus



te de ancoragem.

Como apresentado anteriormente (ver item V.3.6.3), é sabido que o comportamento tempo-deformação de um material é função do nível de tensão a que se encontra submetido.

Desta forma, tem-se ao longo do fuste de um ti rante flexível a interação de comportamentos tempo-desloca mento diversos.

À esta singularidade relativamente aos tirantes rígidos, supõem-se a diversidade do comportamento tensão-tem po-deslocamento entre ambos.

Como o comportamento do tirante rígido (tipo I) tendeu a "estabilizar-se", a níveis de tensões abaixo de cer to valor, era esperado que também este limite existisse para os flexíveis (tipo II), já que cada um desses poderia ser i maginado como uma sucessão de tirantes rígidos parcialmente solidários. A solidariedade parcial (assim considerada pois permite, graças à elasticidade do aço, certo deslocamento re lativo entre os diversos pontos do fuste) é conferida pelos cabos de aço, servindo de elemento de ligação entre os diver sos trechos do bulbo do tirante e o carregamento. Esta hi pótese foi constatada experimentalmente, conforme é apresen tado no item V.5.6.

Nos tirantes flexíveis, o maior nível de tensões

na extremidade superior do fuste, decrescendo gradativamente até a inferior, concorre segundo as leis reológicas para que se desenvolva um gradiente de velocidade de deslocamento ao longo do mesmo, quer no momento da aplicação do carregamento, logo após as deformações imediatas, quer posteriormente com o processo reológico. Entretanto, por estarem os diversos pontos do fuste solidarizados pelo fio de ancoragem, a partir de certo deslocamento relativo, uma maior desaceleração se fará sentir nos trechos de maior velocidade de deslocamento, decrescendo em simultaneidade com a parcela de carregamento atuante neste trecho, enquanto que nos de menor velocidade de deformação, se verificará o inverso, passando nesses locais o carregamento e consequentemente a velocidade de deformação a serem submetidos a um aumento gradativo.

Nos tirantes rígidos, o processo de transferência de tensões descrito acima apresenta-se menos significativo, em virtude da maior solidariedade entre os pontos ao longo do bulbo (resultante da menor deformabilidade do mesmo, relativamente aos flexíveis), que concorrem, conforme já apresentado anteriormente, numa maior semelhança entre os deslocamentos dos seus pontos e uniformização das tensões atuantes.

Devido ao fenômeno de transferência de tensões, é de se esperar que o tempo de estabilização dos tirantes flexíveis, seja diverso do dos rígidos.

O processo acima ainda será mais salientado, caso o material de fundação apresente um comportamento tensão cisalhante-deslocamento, com queda de resistência na ruptura (como é o caso dos ensaios de primeiro carregamento) em virtude da grande transferência de tensões a cada ruptura localizada. Estas hipóteses foram constatadas experimentalmente, como apresentado no item V.5.6. De acordo com os resultados, o tempo de estabilização do ensaio de recarregamento e primeiro carregamento dos tirantes flexíveis tipo II foram, respectivamente, de 7 e 40 minutos, enquanto para os ensaios de recarregamento e primeiro carregamento dos tirantes rígidos (tipo I), entre os quais não houve diferenciação, situou-se entre 1 e 2 minutos.

Como se vê, as diferenças foram significativas, mesmo levando em consideração a não imediata aplicação do carregamento, devido ao sistema, nos tirantes flexíveis, conforme já explicado anteriormente.

A distribuição de tensões nos tirantes flexíveis (tipo II) é mais desuniforme que nos rígidos (tipo I), devido ao deslocamento diferencial ao longo do bulbo, e ao comportamento tensão-deformação do solo. Em consequência, nos tirantes flexíveis assentes em solos nos quais a relação tensão-cisalhante-deslocamento é sempre crescente (solos sem queda de resistência na ruptura, ou solos em geral nos quais a ruptura ainda não foi atingida), as tensões atuantes no topo do bulbo ancorado são superiores às da base. Como, sob um

mesmo carregamento, a resultante das tensões induzidas é a mesma para ambos os tipos de tirantes, conclui-se que nestas condições as tensões e deformações no topo do bulbo dos ti rantes flexíveis são superiores às verificadas nos tirantes rijos, enquanto na base ocorre o inverso.

Para o caso em que o material de fundação apre senta queda de resistência com a ruptura, as diferenças en tre os deslocamentos desses dois tipos de tirantes ainda fi cam mais salientadas tendo em vista que a cada ruptura loca lizada maiores deslocamentos se fazem sentir, de modo a mobi lizar nas regiões inferiores novas parcelas resistentes, ca pazes de compensar a perda.

Os cálculos da parcela de deformação relativa ao solo nos ensaios realizados nos tirantes tipos I e II, não apresentaram um esclarecimento preciso quanto a esta questão (ver item V.5.6).

## CAPÍTULO VII

### VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS TIRANTES ENSAIADOS, SEGUNDO A ABNT, P-NB-565<sup>8</sup>

#### VII.1 INTRODUÇÃO

Nesta seção é realizada uma análise do comportamento quanto à fluência dos tirantes utilizados no ensaio, segundo o item 4.67 da ABNT, P-NB-565 e, também, segundo a norma determinada a carga admissível desses tirantes.

#### VII.2 TIRANTE S-5 TIPO I

O período de duração de cada um dos estágios do "ensaio A" de primeiro carregamento deste tirante foi de 5 minutos, com exceção do último no qual a ruptura foi atingida a 2 minutos de ensaio.

O período mínimo recomendado pela norma para a realização de ensaios de fluência em ancoragens permanentes é de 80 minutos (item 4.64 ABNT, P-NB-565).

Os sete primeiros estágios do ensaio perfizeram um carregamento de 79% da carga de ruptura (1334 Kgf), tendendo rapidamente à estabilização de movimentos, Figuras V.2a e V.2b. A ruptura se deu no oitavo estágio de forma brusca, dois minutos após o acréscimo que lhe deu início.

Analisando a tendência desses gráficos verifica-se que apesar de esses estágios não terem sido mantidos durante o período regulamentar mínimo, é possível considerar-se tais carregamentos como satisfazendo ao limite de deformação de fluência recomendado por norma ( $\chi < 2$  mm), desde que se considere a invariabilidade do comportamento tempo-deslocamento para períodos superiores aos 5 minutos de estágio.

A ABNT, P-NB-565, estabelece para a carga admissível de um tirante um fator de segurança de 1,5 para ancoragens provisórias e 1,75 para ancoragens permanentes desde que satisfeito o limite de deformação de fluência para 1,5 vezes a carga de trabalho no caso de ancoragens permanentes.

Para ancoragem provisória a carga admissível do tirante S-5 tipo I segundo a ABNT, P-NB-565 (fator de segurança a ruptura de 1,5) é igual a 890 Kgf.

Para ancoragem permanente, considerando-se o sêtimo estágio, cujo carregamento foi de 1054 Kgf satisfazendo o limite de deformação por fluência, conforme apresentado acima, a carga de 703 Kgf é considerada admissível (o carregamento de 703 Kgf é 1,5 vezes inferior a 1054 Kgf e satisfaz ao fator de segurança à ruptura recomendado de 1,75).

### VII.3 TIRANTE S-1 TIPO I

O ensaio de primeiro carregamento deste tirante foi realizado em seis estágios. Os tempos de duração desses estágios foram, respectivamente, 5, 7, 78, 1 e 1 dias para os cinco primeiros e 67 minutos para o último no qual se deu a ruptura de forma brusca.

Devido ao longo período de execução do ensaio, a dissipação de poro-pressão nesse tirante tornou-se significativa, concorrendo para uma sensível modificação das características mecânicas iniciais do solo de fundação (resistência ao cisalhamento, comportamento tensão-tempo-deformação).

Os cinco primeiros estágios desse ensaio, que perfizeram um carregamento de 77% da carga de ruptura (2181 Kgf), tenderam rapidamente à estabilização de movimentos, Figuras V.13a à V.17b, semelhantemente aos sete primeiros estãgios do tirante S-5 tipo I. O limite de deformação por fluência ( $\chi < 2$  mm) foi satisfeito em todos estes estágios.

Segundo a ABNT, P-NB-565 a carga admissível em ancoragem provisória no tirante S-1 tipo I é igual a 1455 Kgf para o fator de segurança à ruptura de 1,5.

Para ancoragem permanente a carga de 1145 Kgf é considerada admissível visto que o quinto estágio com um carregamento igual a 1,5 vezes este valor satisfaz o limite de deformação por fluência, e este carregamento de 1145 Kgf está de acordo com o fator de segurança à ruptura recomendado (1,75).

Os valores acima apresentados para a carga admissível de ancoragem permanente e provisória no tirante S-1 tipo I estão relacionados segundo as considerações apresentadas anteriormente em virtude da dissipação de poro-pressão, a índice de vazios e umidade do solo de fundação diversos dos pré-existentes ao ensaio. Ao contrário do tirante S-5 tipo I, cujos valores devido a forma em que foram conduzidos os ensaios estão relacionados as condições de índice de vazios (e umidade) pré-existente aos mesmos.

#### VII.4 TIRANTE S-3 TIPO I

O comportamento ao ensaio de carga deste tirante foi influenciado por elemento estranho ao mesmo que lhe bloqueou parcialmente os movimentos. A influência desse bloqueio se tornou evidente a partir do terceiro estágio de car



ga.

O ensaio foi realizado em sete estágios de carga de um dia de duração cada. Ao final do sétimo estágio, o ensaio foi interrompido e o tirante descarregado, em virtude da pequena representatividade dos últimos estágios, resultante do bloqueio.

Em vista do relativamente pequeno período de duração (7 dias) acredita-se desprezível a dissipação de poro-pressão e, conseqüentemente, a variação de índice de vazios e umidade do solo de fundação neste ensaio.

Os três primeiros estágios, Figuras V.68a à V.70b, nos quais se acredita ter havido pouca ou nenhuma influência do elemento bloqueante, o comportamento tempo-deslocamento foi similar aos verificados nos tirantes S-5 e S-1 tipo I, com uma rápida estabilização de deslocamentos. Portanto, o limite de deformação por fluência foi satisfeito para estes estágios.

Para os demais estágios esta rápida estabilização de movimentos não foi verificada, tendo ocorrido razoáveis deslocamentos, Figuras V.71a à V.74b. Entretanto, também para estes estágios o limite de deformação por fluência foi satisfeito, devido principalmente a influência do bloqueio que impediu a progressão livre de deslocamentos.

VII.5 TIRANTE S-4 TIPO II

O ensaio de primeiro carregamento deste tirante foi realizado em três estágios. O tempo de duração de cada um dos dois primeiros foi de um dia, atingindo-se a ruptura de forma brusca no momento de aplicação do terceiro estágio.

Da mesma forma que para o tirante S-3 tipo I, a credita-se que o tempo de duração desse ensaio foi suficien te para prevenir significativas variações de índice de vazi os e umidade do solo de fundação durante o mesmo.

Os dois primeiros estágios que perfizeram um car regamento de 66% da carga de ruptura (1061 Kgf), se bem que num período de tempo pouco maior, estabilizaram-se semelhan temente aos dos tirantes tipo I, Figuras V.83a a V.84b e Fi gura V.100. O limite de deformação a fluência foi satisfei to para ambos os estágios.

A carga admissível em ancoragem provisória neste tirante, segundo a norma, é igual a 707 Kgf, para o fator de segurança a ruptura de 1,5.

Para ancoragem permanente, a carga de 464 Kgf é considerada admissível, visto o segundo estágio, com um car regamento igual a 1,5 vezes este valor, satisfazer o limite de deformação por fluência, e este carregamento de 464 Kgf es tar de acordo com fator de segurança a ruptura recomendado (1,75).

## CAPÍTULO VIII

### SUMÁRIO DE CONCLUSÕES

#### VIII.1 ALONGABILIDADE DO BULBO ANCORADO

- 1.1 Os tirantes de bulbo mais rígido apresentaram um comportamento diverso com relação ao mais flexível, no que diz respeito à capacidade de carga e ao comportamento tempo-tensão-deslocamento.
- 1.2 Apresentou-se um índice (seção III.3), o qual denominou-se, "distribuição específica de tensões", com vistas a estabelecer um parâmetro numérico representativo de alongabilidade de tirantes de bulbo tracionado em terrenos diversos.
- 1.3 A expressão estabelecida para a distribuição específica de tensões, salienta ser o comportamento de tirantes, quanto à alongabilidade, função direta do comprimento do bulbo, do módulo tensão cisalhante-deslocamen

to, do diâmetro do bulbo, e função inversa do módulo de elasticidade dos cabos de atirantamento, e da área equivalente do bulbo ancorado.

## VIII.2 CAPACIDADE DE CARGA (VER FIGURA VIII.1)

2.1 A capacidade de carga não drenada do tirante S-4 tipo II, de bulbo mais flexível, foi igual a 80% do valor do tirante S-5 tipo I de bulbo mais rígido.

Nos ensaios de recarregamento esta relação foi de 60,5% (ver seção V.4.4).

2.2 O valor da tensão média de ruptura do ensaio não drenado no tirante S-5 tipo I de bulbo mais rígido ( $0,23 \text{ Kgf/cm}^2$ ), aproximou-se mais dos resultados dos ensaios (UU) de laboratório com solo amolgado (valores situados entre  $0,20$  e  $0,27 \text{ Kgf/cm}^2$ ), do que com solo indeformado ( $0,45$  e  $0,55 \text{ Kgf/cm}^2$ ). Os ensaios de recarregamento desse tirante, apresentaram um valor para tensão média de ruptura ( $0,16 \text{ Kgf/cm}^2$ ) também compatível com a faixa dos ensaios (UU) amolgados de laboratório (ver seção V.2.2).

2.3 No ensaio do tirante S-1 tipo I, cujos estágios de carregamento foram mantidos por um período mais longo (perfazendo um total de 92 dias) a tensão média de ruptura

(0,38 Kgf/cm<sup>2</sup>) apresentou-se igual a 164% do valor obtido com o tirante S-5 tipo I. Ambos os tirantes, assim como os demais, foram executados de forma semelhante, procurando conferir-se-lhes iguais dimensões geométricas. Acredita-se que o aumento verificado na capacidade de carga do tirante S-1 tipo I tenha se originado na dissipação parcial da poro-pressão, que neste ensaio, em vista do maior tempo de duração pode ter sido significativa (ver item V.3.4). A influência dessa dissipação, também parece ter ficado salientada no comportamento tensão-tempo-deslocamento.

2.4 No primeiro ensaio de recarregamento não drenado do tirante S-1 tipo I a tensão média de ruptura (0,36 Kgf/cm<sup>2</sup>) apresentou-se igual a 218% da correspondente ao ensaio, também não drenado, executado no tirante S-5 tipo I. O adensamento, resultante da dissipação durante o ensaio de primeiro carregamento (item anterior), parece apresentar-se como a causa principal dessa diferença (ver item V.3.4).

2.5 No último ensaio ("ensaio E") das primeiras séries de ensaios de recarregamento do tirante S-1 tipo I a tensão média de ruptura (0,29 Kgf/cm<sup>2</sup>) apresentou-se igual a 80% do primeiro ensaio de recarregamento realizado logo após a "primeira" ruptura. Entre estes dois ensaios decorreram 13 dias, nos quais foram efetuados ensaios de pequeno período de carregamento (na maioria,

de aproximadamente 45 minutos), seguido por descarregamento, iniciando-se novo ensaio somente no dia seguinte. Acredita-se que este processo de carga e descarga, com pequena dissipação de poro-pressão em virtude do pequeno período de duração dos ensaios, tenha concorrido para que, a cada ensaio, uma nova parcela de pressão-neutra fosse acumulada, resultando num decréscimo de capacidade de carga pela redução das pressões efetivas (ver item V.3.4).

### VIII.3 SENSIBILIDADE (VER FIGURA VIII.2)

- 3.1 O valor da sensibilidade, tal como definida no item V.2.3, do ensaio do tirante S-5 tipo I foi de 1,44, inferior portanto, à faixa (1,7 e 3,3) obtida nos ensaios de laboratório com amostra natural da profundidade de assentamento do tirante. A comparação entre estes resultados, indica que a argila através da qual se processou a ruptura, na região do bulbo do tirante, apresentava-se mais amolgado do que as amostras de laboratório consideradas "indeformadas" (ver item V.2.3).
- 3.2 A sensibilidade, como definida no item V.2.3, do ensaio do tirante S-1 tipo I teve o valor de 1,06. De acordo com considerações apresentadas no item V.3.5, em vista da grande diferença entre os intervalos de tempo

de ruptura dos ensaios de primeiro carregamento (1 hora) e primeiro de recarregamento (1 minuto), acredita-se que este parâmetro seja mais corretamente representado pela faixa 1,06 e 1,33. Comparando esta faixa com o valor da sensibilidade obtida nos ensaios de laboratório e no tirante S-5 tipo I, conclui-se que o material de fundação desse tirante atravês do qual se processou a ruptura, apresentava-se mais amolgado. Acredita-se que este maior grau de amolgamento seja oriundo das deformações lentas desenvolvidas durante o ensaio de fluência, que neste tirante, em vista dos 92 dias de ensaio, foram mais salientadas.

- 3.3 Os ensaios realizados no tirante S-4 tipo I, apresentaram um valor igual a 2,0 para a sensibilidade. Este valor não é muito representativo, em vista da forma imediata em que se processou a ruptura do ensaio de primeiro carregamento, levando a acreditar que o carregamento desse ensaio tenha sido superior ao necessário para esta desenvolver-se.

#### VIII.4 COMPORTAMENTO TEMPO-TENSÃO-DESLOCAMENTO

- 4.1 As curvas tempo-deformação basicamente se comportaram de forma semelhante para todos os ensaios, quer nos tirantes de maior rigidez (tipo I) como no de menor rigi

dez (tipo II), para os ensaios de primeiro carregamento, como para os de recarregamento. Nestas curvas, a níveis de tensão fora da ruptura, observou-se um decréscimo do coeficiente angular das curvas traçadas em escala log-normal, com o tempo de ensaio (ver considerações item VI.3).

- 4.2 O "tempo de estabilização" (tempo no qual a velocidade de deslocamento do tirante é baixa o suficiente para que seja considerado erroneamente estabilizado) do tirante mais flexível (tipo II) é superior ao do tirante mais rígido (tipo I). Enquanto no tirante tipo I, o tempo de estabilização situou-se em 1 e 2 minutos, no tirante S-4 tipo II nos ensaios de primeiro carregamento foi superior a 40 minutos, e nos de recarregamento 7 minutos (ver considerações item VI.3).
- 4.3 O parâmetro  $m$  de Mitchell obtido nos ensaios dos tirantes do tipo mais rígido (S-1 e S-3 tipo I), apresentou-se igual a 2,118. O valor desse parâmetro nos ensaios de laboratório com amostra natural da profundidade de assentamento do tirante foi de 0,9. Segundo Singh e Mitchell<sup>7</sup> o parâmetro  $m$  é uma constante para um dado material, variando de solo para solo entre os valores 0,4 e 1,3. O valor obtido no ensaio dos tirantes tipo I situou-se acima dessa faixa levando a acreditar na influência do tipo de ensaio nesse parâmetro (ver item V.3.6.3 e V.4.6.3).



4.4 O parâmetro  $\alpha'$  (similar ao de Mitchell) obtido nos 3 últimos estágios do ensaio de primeiro carregamento do tirante S-1 tipo I, foi de  $2,48 \log (\text{cm/min})/\text{Kgf/cm}^2$ ; para os ensaios de recarregamento este parâmetro teve o valor de  $3,27 \log (\text{cm/min})/\text{Kgf/cm}^2$ . A razão entre esses parâmetros apresentou-se igual a  $0,76$ , compatível de acordo com a constância do produto  $\alpha D_{\max}$  com o inverso da razão entre os valores da capacidade de carga do ensaio de primeiro carregamento e recarregamento, igual que é ao inverso da sensibilidade definida pela faixa  $0,94$  e  $0,75$  (ver item V.3.6.3).

4.5 O parâmetro  $\alpha'$  obtido nos dois primeiros estágios do ensaio de primeiro carregamento do tirante S-3 tipo I foi de  $4,03 \log (\text{cm/min})/\text{Kgf/cm}^2$ . A razão entre este parâmetro e o correspondente aos três últimos estágios do ensaio de primeiro carregamento do tirante S-1 tipo I tem o valor de  $1,62$ .

Este tirante não foi levado a ruptura devido a um problema executivo, que concorreu para que a partir do terceiro estágio passasse o tirante a sofrer grande influência de um elemento bloqueante. Entretanto, por sua característica não drenada era de esperar para a capacidade de carga desse tirante um valor similar ao do tirante S-5 tipo I, também não drenado, de execução idêntica. A relação entre os valores da capacidade de carga dos ensaios de primeiro carregamento entre os tirantes S-1 e S-5 tipo I foi de  $1,64$ , portanto, bem

similar, conforme se esperava de acordo com as considerações anteriores e a constância do produto  $\alpha D_{\max}$  com a razão entre os parâmetros  $\alpha'$ , 1,62; relativo aos ensaios de primeiro carregamento do tirante S-1 e S-3 tipo I (ver item V.4.4.3).

- 4.6 Os ensaios de fluência, não drenados para níveis de tensão elevados, a partir de dado instante, modificam seu comportamento tempo-deformação, passando a acelerar-se, até finalmente atingir-se a ruptura. Os ensaios realizados nos tirantes (tipo I) em estudo apresentaram este comportamento; no entanto, após certo tempo, a fase acelerada foi substituída por outra de desaceleração, retornando ou não em seguida à fase acelerada e assim sucessivamente, até atingir-se a ruptura brusca nos ensaios de maior nível de tensões.

Conforme é apresentado no item V.3.6.3, levantou-se a hipótese desse comportamento ser função do desenvolvimento de forças de sucção na base, que por sua vez seria função crescente do deslocamento. Por esse motivo sua influência faz-se maior ao longo da fase acelerada, na qual os deslocamentos sofrem grande incremento, podendo freiar ou até mesmo interromper o processo de ruptura, como se constatou em alguns casos.

- 4.7 A curva tempo-tensão-deslocamento do ensaio do tirante S-1 tipo I, após o terceiro e mais longo estágio (78 dias), apresentou sensível acréscimo no módulo tensão-

-deformação a cada tempo. Acredita-se que este comportamento foi resultante da consolidação oriunda da dissipação parcial da pressão-neutra, que deve ter sido considerável, devido à grande duração desse estágio (ver item V.3.6.2).

- 4.8 O comportamento tensão-velocidade de deslocamento do tirante S-1 tipo I, sofreu variações com a significativa dissipação de pressões que se verificou nos seus estágios de maior período de duração (ver itens V.3.6.3 e V.4.6.3).
- 4.9 Os diversos estágios dos ensaios de primeiro carregamento de ambos os tipos de tirantes, com exceção daqueles nos quais a ruptura foi atingida, satisfizeram o limite de fluência recomendado para solos coesivos da ABNT, P-NB-565 (ver seção VII).

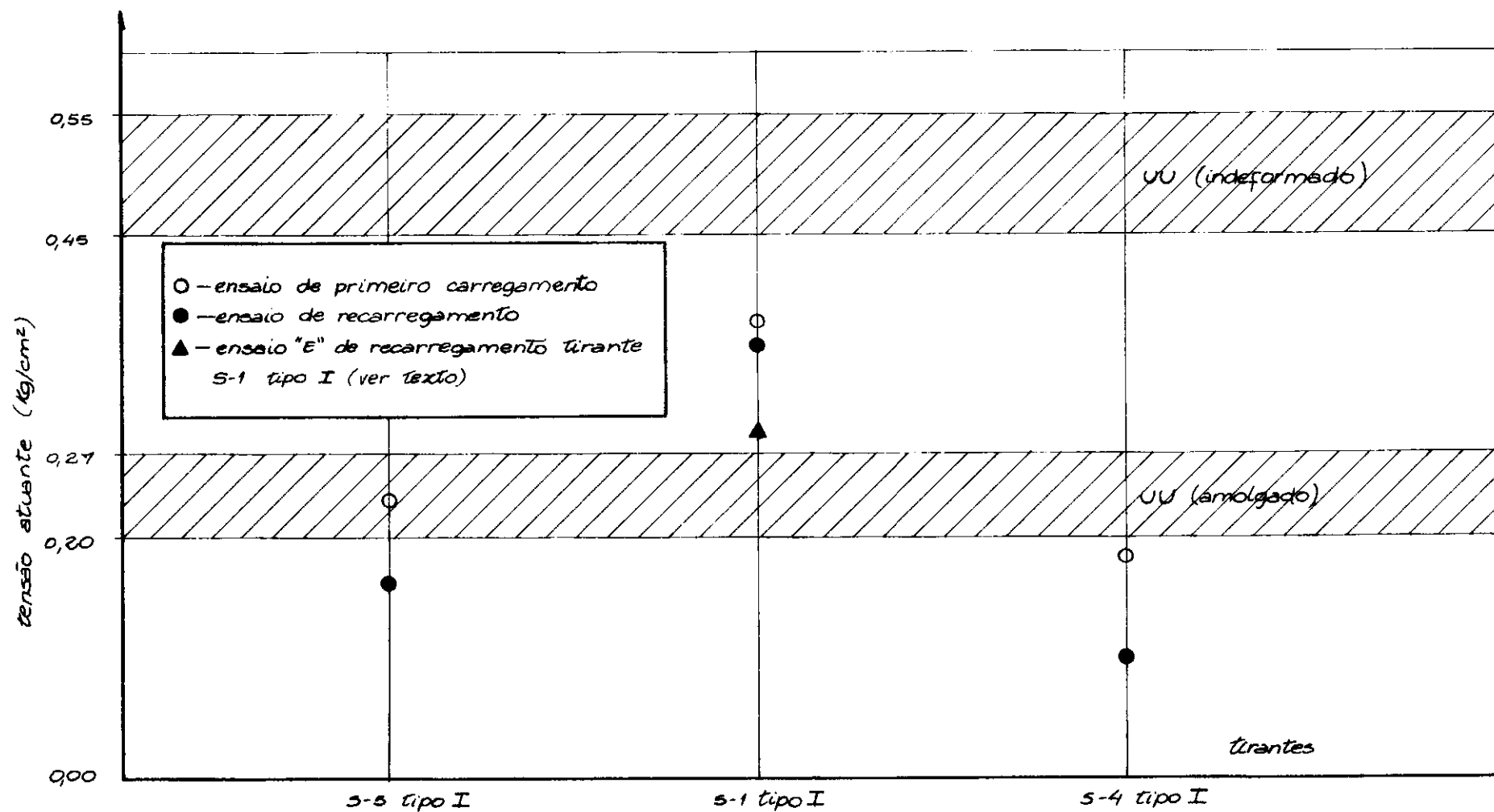


FIG. VIII.1. CAPACIDADE DE CARGA

sensibilidade ( $R_I / R_{II}$ )

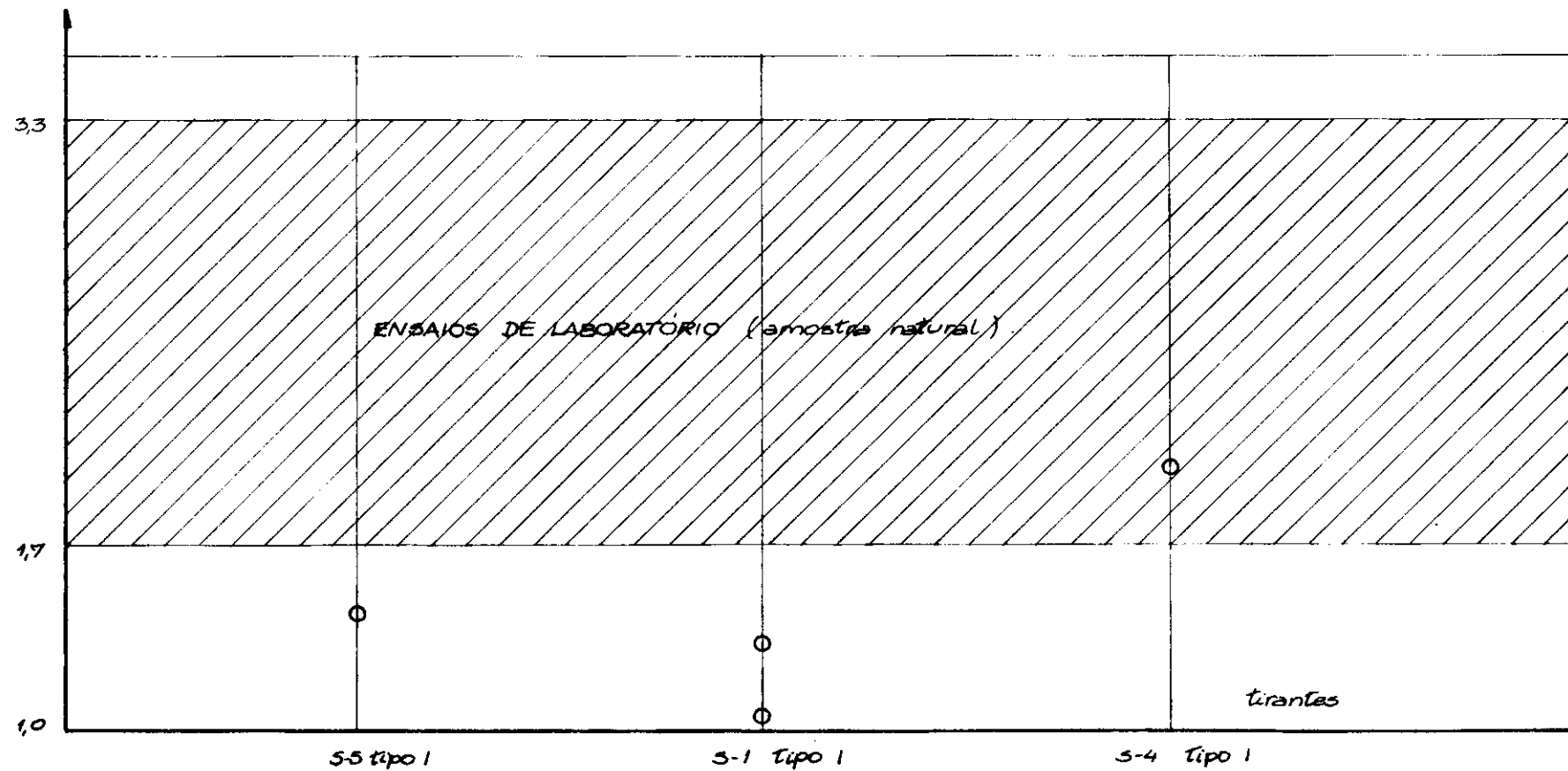


FIG. VIII. 2. SENSIBILIDADE

## CAPÍTULO IX

### COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES

Esta pesquisa demonstrou a possibilidade de ancoragens em condições similares as do ensaio (cargas estáticas constantes) no depósito em que foi realizado o estudo, constituído de uma argila orgânica de consistência mole.

Entretanto, recomenda-se sejam realizadas pesquisas adicionais quanto ao problema de cargas repetidas e vibrações. No que foi possível se verificar nesta pesquisa, ancoragens neste material são sujeitas a perda de capacidade de carga quando submetidos a cargas repetidas (ver ensaios de recarregamento tirante S-1 tipo I). Durante os ensaios também ficou salientado o problema de vibrações. Uma batida no sistema de aplicação de carga, bem como passagens de mãquinas pesadas acarretavam modificação no comportamento tensão-tempo-deslocamento, com rápidos acrêscimos de deslocamento.

Os gráficos tempo-deslocamento em escala log-normal, apresentaram-se nestes ensaios com uma curva de conformação decrescente para níveis de tensões inferiores aos de ruptura, ao invés de linear que de acordo com Ostermayer <sup>4</sup> representa a conformação mais geral.

Foi verificado um ganho de resistência com o tempo devido provavelmente à dissipação parcial de poro-pressões. Este fato é positivo pois representa um acréscimo de segurança para ancoragens realizadas nesse material.

Acredita-se recomendável a realização de novas pesquisas, similares a estas, com tirantes de base aberta através de um tubo que a ligaria ao exterior, para complementar o estudo da influência dos esforços gerados pela sucção na base de tirantes. Julga-se útil também a execução de novos ensaios com tirantes de bulbo de diversos graus de rigidez, para complementação do estudo da influência da "distribuição específica de tensões" em tirantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. VESIC, A.S.: "Breakout Resistance of Objects Embedded in Ocean Bottom". ASCE JSMFD, SM9, Setembro 1971.
2. MEYERHOF, G.G. e ADAMS, J.I.: "The Ultimate Uplift Capacity of Foundations". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 5, nº 4, Novembro 1968.
3. BHATNAGAR, R.S.: "Pullout Resistance of Anchors in Silty Clay". Duke Soil Mechanics Series nº 18, 1969.
4. OSTERMAYER, H.: "Construction, Carrying Behaviour and Creep Characteristic of Ground Anchors". Diaphragm Walls and Anchorages, Institution of Civil Engineers, London, 1975.
5. MITCHELL, Y.K.: "Fundamentals of Soil Behavior". John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1976.



6. SINGH, A. e MITCHELL, Y.K.: "General Stress-Strain-Time Function for Soils". ASCE JSMFD, SM1, Janeiro 1968.
7. SINGH, A. e MITCHELL, Y.K.: "Creep Potential and Creep Rupture of Soils". Proceedings of 7<sup>th</sup> ICOSOMEF, México, 1969.
8. ABNT, P-NB-565: "Norma Brasileira Para Estruturas Ancoradas no Terreno e Ancoragens Injetadas no Terreno (em estágio experimental)".
9. VILELA, T.F.: "Determinação dos Parâmetros de Resistência, "Creep", e Relaxação de Tensões de uma Argila Mole do Rio de Janeiro". Tese M.Sc., COPPE, 1976.
10. SCHMID, W.E. e PRIETO, M.: "A Study of Anchorages for Transmission Tower Foundations". Ontario Hydro Research Division, Soils Section, Junho 1971.
11. ADAMS, Y.I. e KLYM, T.W.: "Earth Anchors. Stress Distribution Analysis and Design". Proceedings of 5<sup>th</sup> ICOSOMEF, Paris 1961.
12. EHRLICH, M.: "Um Novo Medidor de Deslocamentos Verticais". Revista Solos e Rochas, COPPE/UFRJ (submetido para publicação).

13. ALI, M.S.: "Pullout Resistance of Anchor Plates and Anchor Piles in Soft Bentonite Clay". Duke Soil Mechanics Series, n° 17, 1968.
14. COPPETEC/ET-514/75.

## APÊNDICE 1

### DEDUÇÃO DA EXPRESSÃO DO DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES CISALHANTES AO LONGO DO FUSTE DE ANCORAGENS DE TIRANTES DE BULBO TRACIONADO

#### 1.1 SIMBOLOGIA

$\tau(x)$  = tensão cisalhante atuante num ponto do bulbo de an\_ coragem situado a uma distância (x) da extremidade inferior do mesmo;  $(FL^{-2})$ .

Q = carregamento atuante no tirante; (F).

$\Delta(x)$  = deslocamento verificado num ponto do bulbo de anco\_ ragem situado a uma distância (x) da extremidade in\_ ferior do mesmo; (L).

$\Delta(0)$  = deslocamento verificado na extremidade inferior do bulbo de ancoragem; (L).

$M_s$  = módulo tensão cisalhante-deslocamento;  $(FL^{-3})$ .

$E_a$  = módulo de elasticidade do material dos cabos de at  
ranteamento;  $(FL^{-2})$ .

$A_e$  = área equivalente do bulbo de ancoragem (ver item 1.  
.5);  $(L^2)$ .

$D$  = diâmetro do bulbo;  $(L)$ .

$\sigma(x)$  = tensão normal equivalente verificada num ponto do  
bulbo de ancoragem situado a uma distância  $(x)$  da  
extremidade inferior do mesmo (ver item 1.5);  $(FL^{-2})$ .

## 1.2 HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS

Constância do módulo tensão cisalhante-desloca-  
mento ( $M_s$ ) com o deslocamento e ao longo do comprimento do  
fuste de ancoragem.

## 1.3 DEDUÇÃO DA EXPRESSÃO

Segundo a hipótese da linearidade entre tensões  
e deslocamento ( $M_s$  constante), tem-se para um ponto situado  
a uma distância  $(x)$  da extremidade inferior do bulbo de anco-  
ragem, a seguinte expressão:

$$\tau(x) = M_s \Delta(x) \quad (1.1)$$

Considerando a deformabilidade do bulbo tem-se que o deslocamento  $\Delta(x)$  de um ponto qualquer situado a uma distância  $(x)$  da extremidade inferior do bulbo de ancoragem é relacionado pela seguinte expressão:

$$\Delta(x) = \int_0^x \frac{\sigma(x)}{E_a} dx + \Delta(0) \quad (1.2)$$

Através das expressões (1.1) e (1.2) tem-se:

$$\tau(x)/M_s = \int_0^x \frac{\sigma(x)}{E_a} dx + \Delta(0) \quad (1.3)$$

A tensão normal equivalente  $\sigma(x)$  num ponto situado a uma distância  $(x)$  da extremidade inferior do bulbo de ancoragem pode ser relacionada pela expressão:

$$\sigma(x) = 1/A_e (Q - \int_0^{\ell} \tau(x) \pi D dx) \quad (1.4)$$

Através das expressões (1.3) e (1.4) tem-se:

$$\tau(x)/M_s = \int_0^x \left\{ 1/A_e E_a (Q - \int_x^{\ell} \tau(x) \pi D dx) \right\} dx + \Delta(0) \quad (1.5)$$

Integrando e rearrumando a expressão (1.5) tem-se:

$$\tau(x) = \frac{Q}{E_a} \frac{M_s}{A_e} \cdot x + \Delta(0) M_s - \frac{M_s}{E_a} \frac{\pi D}{A_e} \int_0^x \int_x^\ell \tau(x) dx dx \quad (1.6)$$

Denominando:

$$\Delta(0) M_s = C_0 \quad (1.7)$$

$$Q M_s / E_a A_e = C_1 \quad (1.8)$$

$$M_s \pi D / E_a A_e = \alpha^2 \quad (1.9)$$

A expressão (1.6) toma a forma:

$$\tau(x) = C_0 + C_1 x + \alpha^2 \int_0^x \int_\ell^x \tau(x) dx dx \quad (1.10)$$

Aplicando a transformada de Laplace na expressão (1.10):

$$\mathcal{L} \left| \tau(x) \right| = C_0 / S + C_1 / S^2 + \alpha^2 / S \mathcal{L} \left| \int_\ell^x \tau(x) dx \right| \quad (1.11)$$

Como:

$$\mathcal{L} \left| \int_\ell^x \tau(x) dx \right| = 1/S \mathcal{L} \left| \tau(x) \right| - 1/S \int_0^\ell \tau(x) dx \quad (1.12)$$

Substituindo a expressão (1.12) em (1.11):

$$\mathcal{L} \left| \tau(x) \right| = C_0/S + C_1/S^2 + \alpha^2/S^2 \mathcal{L} \left| \tau(x) \right| - \alpha^2/S^2 \int_0^{\ell} \tau(x) dx$$

(1.13)

Rearrmando a equação (1.13):

$$\mathcal{L} \left| \tau(x) \right| = \frac{C_0 S}{S^2 - \alpha^2} + \frac{C_1}{S^2 - \alpha^2} - \frac{\alpha^2}{S^2 - \alpha^2} \int_0^{\ell} \tau(x) dx$$

(1.14)

Aplicando a transformada inversa de Laplace na equação (1.14) tem-se:

$$\tau(x) = C_0 \cosh(\alpha x) + (C_1/\alpha) \sinh(\alpha x) - \alpha \left| \int_0^{\ell} \tau(x) dx \right| \sinh(\alpha x)$$

(1.15)

Como:

$$Q = \int_0^{\ell} \tau(x) \pi D dx$$

(1.16)

Tem-se:

$$\int_0^{\ell} \tau(x) dx = Q/\pi D \quad (1.17)$$

Substituindo a equação (1.17) em (1.15) e rearmando tem-se:

$$\tau(x) = C_0 \cosh(\alpha x) + C_2 \sinh(\alpha x) \quad (1.18)$$

sendo:

$$C_2 = \left( \frac{C_1}{\alpha} - \frac{Q\alpha}{\pi D} \right) \quad (1.19)$$

Da expressão (1.18) o único parâmetro desconhecido é  $C_0$ , função do deslocamento da extremidade inferior do bulbo de ancoragem  $\Delta(0)$  (expressão (1.7)). O desenvolvimento a seguir visa a superar esta indeterminação.

Tem-se que:

$$Q = \int_0^{\ell} \tau(x) \pi D dx \quad (1.16)$$

Substituindo a equação (1.18) em (1.16) e integrando:



$$Q = \pi D / \alpha \{ C_0 \sinh(\alpha l) + C_2 (\cosh(\alpha l) - 1) \} \quad (1.20)$$

Substituindo a expressão (1.19) em (1.20) e rearrumando, obtém-se:

$$C_0 = \frac{Q\alpha + \pi D C_2 (1 - \cosh(\alpha l))}{\pi D \sinh(\alpha l)} \quad (1.21)$$

#### 1.4 RESUMO

A expressão do desenvolvimento de tensões cisalhantes do alongo do fuste de ancoragens de tirantes de bulbo tracionado apresenta a forma:

$$\tau(x) = C_0 \cosh(\alpha x) + C_2 \sinh(\alpha x) \quad (1.18)$$

sendo:

$$\alpha = \sqrt{M_s \pi D / E_a A_e} \quad (1.9)$$

$$C_0 = \frac{Q\alpha + \pi D C_2 \{1 - \cosh(\alpha l)\}}{\pi D \sinh(\alpha l)}$$

$$C_1 = Q \, M_s / E_a \, A_e \quad (1.8)$$

$$C_2 = \left( \frac{C_1}{\alpha} - \frac{Q\alpha}{\pi D} \right) \quad (1.19)$$

ou em termos adimensionais:

$$\tau(x) D \ell / Q = C'_0 \cosh(\alpha \ell) + C'_2 \sinh(\alpha \ell) \quad (1.22)$$

$$\alpha = \sqrt{M_s \, \pi D / E_a \, A_e} \quad (1.9)$$

$$C'_0 = \frac{\ell D \alpha + \pi C'_2 \ell \{1 - \cosh(\alpha \ell)\}}{D \pi \sinh(\alpha \ell)} \quad (1.23)$$

$$C'_2 = \left( \frac{\ell D M_s}{E_a \, A_e \, \alpha} - \frac{\ell \alpha}{\pi} \right) \quad (1.24)$$

## 1.5 DETERMINAÇÃO DA ÁREA EQUIVALENTE DO BULBO DE ANCORAGEM

De maneira geral a determinação da área equivalente de ancoragem é feita pela expressão:

$$A_e = A_a + A_m \frac{E_m}{E_a} \quad (1.25)$$

sendo:

$$A_a = \text{área dos cabos de atirantamento; } (L^2).$$

$$A_m = \text{área do material utilizado na formação do bulbo; } (L^2).$$

$$E_m = \text{módulo de elasticidade do material utilizado na formação do bulbo; } (L^2).$$

Entretanto, atenção deve ser dada para o problema de trincamento do material formador do bulbo, que faria com que somente os cabos de ancoragem passassem a ser responsáveis pela deformabilidade do mesmo. Nestas condições a área equivalente passaria a ser a própria área dos cabos de ancoragem.

$$A_e = A_a \quad (1.26)$$

Considerando uma distribuição uniforme de tensões de tração ao longo das seções trasversais do material formador do bulbo de ancoragem, tem-se que a carga  $Q_s$  capaz de produzir o trincamento de uma dada seção (s) é determinada pela expressão:

$$Q_s = \sigma_{Tm} \left( A_m + A_a \frac{E_a}{E_m} \right) \quad (1.27)$$

donde:

$\sigma_{Tm}$  = resistência a tração do material utilizado na formação do bulbo; ( $L^2$ ).

Entretanto, acredita-se que este trincamento possa se desenvolver para uma carga inferior à estabelecida pela expressão (1.27), em virtude da distribuição desuniforme de tensões e do fenômeno de ruptura progressiva.

A carga  $Q_s$  atuante numa seção (s) qualquer distante ( $x_s$ ) da extremidade inferior do bulbo é dada pela expressão:

$$Q_s = Q - \int_{x_s}^{\ell} \tau(x) dx \quad (1.28)$$

Substituindo a expressão (1.18) em (1.28) e integrando tem-se:

$$Q_s = \left\{ Q - \pi D \left[ C_0 \sinh(\alpha \ell) + C_2 \cosh(\alpha \ell) \right] \right. \\ \left. - \pi D (C_0 \sinh(\alpha x_s) + C_2 \cosh(\alpha x_s)) \right\} \quad (1.29)$$

Por definição, a tensão normal equivalente  $\{\sigma(x)\}$  atuante numa seção é a razão entre a carga  $Q_s$  atuante nesta seção e a área equivalente  $A_e$ .

## 1.6 COMENTÁRIOS

A utilização das equações (1.18) e (1.22) é válida na determinação do desenvolvimento de tensões cisalhantes ao longo de fustes de ancoragens de tirantes de bulbo tracionado para os casos nos quais seja razoável a hipótese da linearidade entre tensões e deslocamento ( $M_s$  constante).

Acredita-se que tal situação seja satisfeita para os casos de tirantes submetidos a carregamentos correspondentes a níveis de tensões afastados da ruptura.

Como ficará salientado nos exemplos calculados no Apêndice 2, para os tirantes usuais o valor da constante  $C_2$  é pouco significativo, resultando com que o segundo termo da expressão (1.18) assim também passe a ser. No tirante hipotético a influência do segundo termo da expressão (1.18) foi calculada em 10%, nos demais tipos I e II foi desprezível.

Desprezando este segundo termo as expressões (1.18), (1.22) e (1.29) estabelecidas anteriormente, tomam a forma:

$$\tau(x) = C_0 \cosh(\alpha x) \quad (1.18a)$$

$$\tau(x) D^2 / Q = C'_0 \cosh(\alpha x) \quad (1.22a)$$

$$Q_s = \{Q - \pi D C_0 \sinh(\alpha \ell)\} - \pi D C_0 \sinh(\alpha x_s)$$

(1.29a)

APÊNDICE 2EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO DA EXPRESSÃO ESTABELECIDADA  
NO APÊNDICE 12.1 TIRANTE HIPOTÉTICO2.1.1 CARACTERÍSTICAS

Trata-se de um tirante de cabo com as seguintes especificações hipotéticas:

- Carga de trabalho (Q) = 30.000 Kgf
- Seção de aço ( $A_a$ ) = 10 cm<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidade do aço ( $E_a$ ) =  
=  $2,1 \times 10^6$  Kgf/cm<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidade da argamassa de injeção  
( $E_m$ ) =  $2,1 \times 10^5$  Kgf/cm<sup>2</sup>
- Tensão de ruptura do aço (CA-50A) = 5500 Kgf/cm<sup>2</sup>

- Resistência à tração da argamassa ( $\sigma_{Tm}$ ) =  
= 30 Kgf/cm<sup>2</sup>
- Diâmetro do bulbo de ancoragem (D) = 10 cm
- Comprimento de ancoragem ( $\ell$ ) = 1000 cm
- Módulo tensão cisalhante-deslocamento (Ms) =  
= 3 Kgf/cm<sup>3</sup>.

### 2.1.2 DETERMINAÇÃO DA ÁREA EQUIVALENTE DO BULBO DE ANCORAGEM ( $A_e$ )

Determinação da carga ( $Q_s$ ) capaz de produzir trincamento:

$$Q_s = \sigma_{Tm} \left( A_m + A_a \frac{E_a}{E_m} \right) \quad (1.27)$$

De acordo com a expressão (1.27) o valor de  $Q_s$  é igual a 5356 Kgf.

Como a carga de trabalho é 30.000 Kgf uma razoável porção do comprimento do bulbo de ancoragem apresentar-se-á trincado.

Dessa forma será considerado com a área equiva



lente do bulbo de ancoragem segundo o item 1.5 do Apêndice 1 (equação (1.26)) a própria área dos cabos de ancoragem ( $A_a$ ).

Portanto, a área equivalente ( $A_e$ ) do bulbo de ancoragem desse tirante é igual a  $10 \text{ cm}^2$ .

### 2.1.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

$$\alpha = \sqrt{M_s \pi D / E_a A_e} \quad (1.9)$$

$$C_0 = \frac{Q\alpha + \pi D C_2 (1 - \cosh(\alpha l))}{\pi D \sinh(\alpha l)} \quad (1.21)$$

$$C_1 = Q M_s / E_a A_e \quad (1.8)$$

$$C_2 = \left( \frac{C_1}{\alpha} - \frac{Q\alpha}{\pi D} \right) \quad (1.19)$$

De acordo com as expressões (1.9), (1.21), (1.8) e (1.19), tem-se:

$$\alpha = 2,1 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$$

$$C_0 = 0,466 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$C_1 = 4,3 \times 10^{-3} \text{ Kgf/cm}^3$$

$$C_2 = 0,042 \text{ Kgf/cm}^2$$

#### 2.1.4 DETERMINAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES CISALHANTES AO LONGO DO COMPRIMENTO DO BUL- BO DE ANCORAGEM

$$\tau(x) = C_0 \cosh(\alpha x) + C_2 \sinh(\alpha x) \quad (1.18)$$

De acordo com os parâmetros determinados no item 2.1.3 a expressão (1.18) toma a forma:

$$\begin{aligned} \tau(x) = & 0,466 \cosh(2,1 \times 10^{-3} x) \\ & + 0,042 \sinh(2,1 \times 10^{-3} x). \end{aligned}$$

Pela expressão acima tem-se que a tensão atuante na extremidade superior e inferior do bulbo do tirante sob a carga de trabalho têm os valores respectivamente de 2,10 e 0,47 Kgf/cm<sup>2</sup>. Sendo os deslocamentos correspondentes, iguais a 0,70 e 0,16 cm, respectivamente.

Na Figura III.29 apresenta-se a distribuição de tensões cisalhantes desse tirante segundo a expressão determinada.

### 2.1.5 CÁLCULO DA "DISTRIBUIÇÃO ESPECÍFICA DE TENSÕES" DO TIRANTE

A "distribuição específica de tensões" (DT) definida no item III.3.1, é calculada pela expressão:

$$DT = \alpha^2 \ell \quad (III.4)$$

De acordo com a expressão (III.4) a "distribuição específica de tensões" desse tirante é igual a  $0,441 \text{ m}^{-1}$ .

## 2.2 TIRANTE TIPO I - RÍGIDO

### 2.2.1 CARACTERÍSTICAS

Trata-se de um tirante de 8 fios  $\phi 8 \text{ mm}$  CP 140-135:

- Seção de aço ( $A_a$ ) =  $4 \text{ cm}^2$
- Módulo de elasticidade do aço ( $E_a$ ) =

$$= 2,1 \times 10^6 \text{ Kgf/cm}^2$$

- Módulo de elasticidade da argamassa de injeção ( $E_m$ ) =  $2,1 \times 10^5 \text{ Kgf/cm}^2$
- Tensão de ruptura do aço (CP 140-135) =  $14.000 \text{ Kgf/cm}^2$
- Resistência a tração da argamassa ( $\sigma_{Tm}$ ) =  $27 \text{ Kgf/cm}^2$  (estimada)
- Diâmetro do bulbo de ancoragem (D) = 11,45 cm
- Comprimento de ancoragem (L) = 150 cm
- Módulo tensão cisalhante-deslocamento ( $M_s$ ) =  $1,28 \text{ Kgf/cm}^2$ .

### 2.2.2 DETERMINAÇÃO DA ÁREA EQUIVALENTE DO BULBO DE ANCORAGEM ( $A_e$ )

Determinação da carga ( $Q_s$ ) capaz de produzir trincamento:

$$Q_s = \sigma_{Tm} \left( A_m + A_a \frac{E_a}{E_m} \right) \quad (1.27)$$

De acordo com a expressão (1.27) o valor de  $Q_s$  é igual a 3752 Kgf.

O maior carregamento atuante num tirante desse tipo (tirante S-1 tipo I) foi de 2181 Kgf.

Supondo que não tenha desenvolvido trincamentos, o valor da área equivalente ( $A_e$ ) do bulbo de ancoragem se gundo a expressão:

$$A_e = A_a + A_m \frac{E_m}{E_a} \quad (1.25)$$

é igual a 14 cm<sup>2</sup>.

Caso o trincamento tenha-se desenvolvido, segundo a equação (1.26) a área equivalente ( $A_e$ ) do bulbo de ancoragem teria o valor de 4 cm<sup>2</sup>.

### 2.2.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

De acordo com as expressões (1.9), (1.21), (1.8) e (1.19) para a área equivalente igual a 14 cm<sup>2</sup> e uma carga de trabalho de 1000 Kgf tem-se:

$$\alpha = 1,25 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$$

$$C_0 = 0,184 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$C_1 = 4,35 \times 10^{-5} \text{ Kgf/cm}^3$$

$$C_2 = 8 \times 10^{-5} \text{ Kgf/cm}^2$$

Para a área equivalente igual a  $4 \text{ cm}^2$  e a carga de trabalho de 1000 Kgf tem-se:

$$\alpha = 2,33 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$$

$$C_0 = 0,182 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$C_1 = 1,52 \times 10^{-4} \text{ Kgf/cm}^3$$

$$C_2 = 6 \times 10^{-4} \text{ Kgf/cm}^2$$

#### 2.2.4 DETERMINAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES CISALHANTES AO LONGO DO COMPRIMENTO DO BULBO DE ANCORAGEM

Utilizando a expressão (1.18) e as constantes de terminadas no item 2.2.3, tem-se:

19) Para  $A_e = 14 \text{ cm}^2$ :

Extremidade superior:

- tensão cisalhante =  $0,187 \text{ Kgf/cm}^2$
- deslocamento =  $0,146 \text{ cm}$

Extremidade inferior:

- tensão cisalhante =  $0,184 \text{ Kgf/cm}^2$
- deslocamento =  $0,144 \text{ cm}$ .

29) Para  $A_e = 4 \text{ cm}^2$ :

Extremidade superior:

- tensão cisalhante =  $0,193 \text{ Kgf/cm}^2$
- deslocamento =  $0,151 \text{ cm}$

Extremidade inferior:

- tensão cisalhante =  $0,182 \text{ Kgf/cm}^2$
- deslocamento =  $0,142 \text{ cm}$ .

Na Figura III.30 apresenta-se a distribuição de tensões cisalhantes desse tirante para ( $A_e = 4 \text{ cm}^2$ ) segundo a expressão determinada.

#### 2.2.5 CÁLCULO DA "DISTRIBUIÇÃO ESPECÍFICA DE TENSÕES" DO TIRANTE

A "distribuição específica de tensões" definida no item III.3.1, apresentou-se neste tirante igual a  $0,023$  e

$0,081 \text{ m}^{-1}$ , para, respectivamente, as áreas equivalentes ( $A_e$ ) de  $14 \text{ cm}^2$  e  $4 \text{ cm}^2$ .

## 2.3 TIRANTE TIPO II - FLEXÍVEL

### 2.3.1 CARACTERÍSTICAS

Trata-se de um tirante de um único fio  $\phi 8 \text{ mm}$  CP 140-135:

- Seção de aço ( $A_a$ ) =  $0,5 \text{ cm}^2$
- Módulo de elasticidade do aço ( $E_a$ ) =  
=  $2,1 \times 10^6 \text{ Kgf/cm}^2$
- Módulo de elasticidade da argamassa de injeção ( $E_m$ ) =  $2,1 \times 10^5 \text{ Kgf/cm}^2$
- Tensão de ruptura do aço (CP-140-135) =  
=  $14.000 \text{ Kgf/cm}^2$
- Resistência à tração da argamassa ( $\sigma_{Tm}$ ) =  
=  $27 \text{ Kgf/cm}^2$  (estimada)
- Diâmetro do bulbo de ancoragem (D) =  $11,45 \text{ cm}$
- Comprimento de ancoragem ( $\ell$ ) =  $150 \text{ cm}$
- Módulo tensão cisalhante-deslocamento ( $M_s$ ) =  
=  $1,28 \text{ Kgf/cm}^2$ .



### 2.3.2 DETERMINAÇÃO DA ÁREA EQUIVALENTE DO BULBO DE ANCORAGEM ( $A_e$ )

A carga ( $Q_s$ ) capaz de produzir trincamentos para este tirante é igual, segundo a expressão (1.29), a 2902 Kgf.

Os estágios de carregamento no tirante S-4 tipo II foram, respectivamente, de 335, 737 e 1102 Kgf (carga a plicada).

Comparando os valores dos diversos estágios de carregamento do tirante S-4 tipo I com a carga capaz de pro duzir trincamentos determinada pela expressão (1.27), con clui-se que dificilmente os dois primeiros estágios trincariam o bulbo. No caso do terceiro estágio, em vista da dis tribuição irregular de tensões, conforme apresentado no item 1.5 do Apêndice 1, talvez parte do comprimento do bulbo de ancoragem teria se trincado.

Entretanto, conforme encontra-se apresentado no item III.3.2, acredita-se que a resistência à tração da argama massa ( $27 \text{ Kgf/cm}^2$ ) calculada de acordo com o fator ãgua-cimento de 0,5 não seja representativa de sua real resistência (esta afirmativa também é válida para o caso dos tirantes ti po I cujo cálculo foi apresentado no item 2.2), apresentando-se por esse motivo o valor  $Q_s$  superestimado. Segundo o comportamento verificado nesse tirante durante o ensaio (item V.5) acredita-se que seja possível que o trincamento tenha

se desenvolvido inclusive no primeiro estágio.

Supondo que o trincamento não tenha se desenvolvido, o valor da área equivalente ( $A_e$ ) do bulbo de ancoragem segundo a expressão (1.25) é igual a 11 cm<sup>2</sup>.

Caso o trincamento tenha se desenvolvido, segundo a expressão (1.26), a área equivalente ( $A_e$ ) passa a 0,5 cm<sup>2</sup>.

### 2.3.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

De acordo com as expressões (1.9), (1.21), (1.8) e (1.19) para a área equivalente de 11 cm<sup>2</sup> e uma carga de trabalho de 1000 Kgf, tem-se:

$$\alpha = 1,41 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$$

$$C_0 = 0,184 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$C_1 = 5,5 \times 10^{-5} \text{ Kgf/cm}^3$$

$$C_2 = 10 \times 10^{-5} \text{ Kgf/cm}^2$$

Para a área equivalente igual a 0,5 cm<sup>2</sup> e a carga de trabalho de 1000 Kgf, tem-se:

$$\alpha = 6,62 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$$

$$C_0 = 0,158 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$C_1 = 1,22 \times 10^{-3} \text{ Kgf/cm}^3$$

$$C_2 = 11 \times 10^{-5} \text{ Kgf/cm}^2$$

#### 2.3.4 DETERMINAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES CISALHANTES AO LONGO DO COMPRIMENTO DO BUL- BO DE ANCORAGEM

Pela expressão (1.18) utilizando as constantes determinadas no item 2.23, tem-se:

1º) Para  $A_e = 11 \text{ cm}^2$ :

##### Extremidade superior:

- tensão cisalhante =  $0,188 \text{ Kgf/cm}^2$
- deslocamento =  $0,147 \text{ cm}$

##### Extremidade inferior:

- tensão cisalhante =  $0,184 \text{ Kgf/cm}^2$
- deslocamento =  $0,144 \text{ cm}$

29) Para  $A_e = 0,5 \text{ cm}^2$ :

Extremidade superior:

- tensão cisalhante =  $0,243 \text{ Kg/cm}^2$
- deslocamento =  $0,190 \text{ cm}$

Extremidade inferior:

- tensão cisalhante =  $0,158 \text{ Kg/cm}^2$
- deslocamento =  $0,123 \text{ cm}$

Na Figura III.31 apresenta-se a distribuição de tensões cisalhantes desse tirante para ( $A_e = 0,5 \text{ cm}^2$ ) segundo a expressão determinada.

#### 2.2.5 CÁLCULO DA "DISTRIBUIÇÃO ESPECÍFICA DE TENSÕES" DO TIRANTE

A "distribuição específica de tensões" definida no item III.3.1, apresentou-se neste tirante igual a  $0,030$  e  $0,657 \text{ m}^{-1}$ , para, respectivamente, as áreas equivalentes ( $A_e$ ) de  $11 \text{ cm}$  e  $0,5 \text{ cm}^2$ .

SIMBOLOGIA

|                         |                                                                                          |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a$                     | aderência fio de ancoragem-cimento.                                                      |
| $A$                     | valor de $\dot{\epsilon}$ para $D = 0$ e $t = t_1$ .                                     |
| $A_a$                   | área dos cabos de atirantamento.                                                         |
| $A_e$                   | área equivalente do bulbo de ancoragem.                                                  |
| $A_c$                   | atividade coloidal.                                                                      |
| $^{\circ}\text{C}$      | temperatura em graus Celsius.                                                            |
| $C'$                    | coesão efetiva.                                                                          |
| $\overline{\text{CIU}}$ | ensaio triaxial adensado isotropicamente não-dre-<br>nado com medição de pressão neutra. |
| $C_0$                   | parâmetro da expressão (III.2) (1.18 Apêndice).                                          |
| $C_2$                   | parâmetro da expressão (III.2) (1.18 Apêndice).                                          |
| $C_2$                   | valor de $\Delta$ para $t = \infty$ no gráfico $\Delta \times t^{-1,118}$ .              |
| $C_1$                   | parâmetro da expressão (1.10).                                                           |
| $C_1$                   | coeficiente angular da reta do gráfico $\Delta \times t^{-1,118}$ .                      |

|                |                                                                                             |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $C'_0$         | parâmetro adimensional da expressão (1.18a).                                                |
| $C'_2$         | parâmetro adimensional da expressão (1.18a).                                                |
| D              | tensão-desvio.                                                                              |
| D              | diâmetro do bulbo.                                                                          |
| DT             | distribuição específica de tensões.                                                         |
| $D_{\max}$     | tensão-desvio máxima.                                                                       |
| $D_I$          | $D_{\max}$ no ensaio de primeiro carregamento do <u>tiran</u><br>te.                        |
| $D_{II}$       | $D_{\max}$ no ensaio de recarregamento do tirante.                                          |
| $(D_{\max})_A$ | $D_I$ para um tirante num solo com índice de vazios<br>$e_A$ .                              |
| $(D_{\max})_B$ | $D_I$ para um tirante num solo com índice de vazios<br>$e_B$ .                              |
| e              | índice de vazios.                                                                           |
| $e_A$          | índice de vazios A.                                                                         |
| $e_B$          | índice de vazios B.                                                                         |
| $E_{50}$       | módulo de deformação secante para níveis de <u>ten</u><br>sões 50% da máxima tensão-desvio. |
| $E_a$          | módulo de elasticidade do material dos cabos de<br>atirantamento.                           |

|             |                                                                                                                                  |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E_m$       | módulo de elasticidade do material utilizado na formação do bulbo dos tirantes.                                                  |
| G           | densidade real dos grãos.                                                                                                        |
| IC          | índice de consistência.                                                                                                          |
| IP          | índice de plasticidade.                                                                                                          |
| $K_s$       | coeficiente de fluência.                                                                                                         |
| $K_{28}$    | parâmetro de resistência a 28 dias da pega do <u>ci</u> mento.                                                                   |
| $\ell$      | comprimento do bulbo de ancoragem.                                                                                               |
| LL          | limite de liquidez.                                                                                                              |
| LP          | limite de plasticidade.                                                                                                          |
| m           | coeficiente angular da parte linear do gráfico $\dot{\epsilon} \times \log t$ , e do gráfico $\log \dot{\Delta} \times \log t$ . |
| % Mat. Org. | percentagem de matéria orgânica.                                                                                                 |
| $M_s$       | módulo tensão cisalhante-deslocamento.                                                                                           |
| n           | coeficiente de aderência.                                                                                                        |
| Q           | carregamento.                                                                                                                    |
| $Q_s$       | carga atuante em uma dada seção s, na iminência de trincamento.                                                                  |
| $R_I$       | carga de ruptura do tirante no ensaio de primeiro                                                                                |

carregamento.

|          |                                                                                        |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_{II}$ | carga de ruptura do tirante no ensaio de <u>recarregamento</u> .                       |
| $R_A$    | $R_I$ para um tirante num solo com índice de vazios $e_A$ .                            |
| $R_B$    | $R_I$ para um tirante num solo com índice de vazios $e_B$ .                            |
| s        | seção do bulbo do tirante na iminência de <u>trinca</u> mento.                         |
| S        | sensibilidade.                                                                         |
| $S_u$    | resistência ao cisalhamento não-drenado.                                               |
| t        | tempo.                                                                                 |
| $t_1$    | tempo unitário.                                                                        |
| tipo I   | característica estrutural do tirante, que signifi <u>ca</u> possuir um bulbo rígido.   |
| tipo II  | característica estrutural do tirante, que signifi <u>ca</u> possuir um bulbo flexível. |
| U        | coeficiente de uniformidade.                                                           |
| UU       | ensaio triaxial não-adensado não-drenado.                                              |
| x        | fator água-cimento.                                                                    |



|                |                                                                                                                       |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $x$            | distância de uma dada seção do bulbo de um tirante da extremidade inferior do mesmo.                                  |
| $x_s$          | distância de uma dada seção (s) do bulbo de um tirante na iminência de trincamento, da extremidade inferior do mesmo. |
| $w_{nat}$      | umidade natural.                                                                                                      |
| $\alpha$       | parâmetro da equação (III.2) (1.18 Apêndice).                                                                         |
| $\alpha$       | coeficiente angular da parte linear do gráfico $\log \dot{\epsilon} \times D$ .                                       |
| $\alpha'$      | coeficiente angular da parte linear do gráfico $\log \dot{\Delta} \times D$ .                                         |
| $\alpha'_I$    | $\alpha'$ do ensaio de primeiro carregamento.                                                                         |
| $\alpha'_{II}$ | $\alpha'$ do ensaio de recarregamento.                                                                                |
| $\alpha'_A$    | $\alpha'_I$ para um tirante fundado num dado solo com índice de vazios $e_A$ .                                        |
| $\alpha'_B$    | $\alpha'_I$ para um tirante fundado num dado solo com índice de vazios $e_B$ .                                        |
| $\gamma$       | distorção angular.                                                                                                    |
| $\gamma_{nat}$ | peso específico aparente úmido.                                                                                       |
| $\Delta$       | deslocamento da extremidade superior do trecho livre dos tirantes.                                                    |

|                  |                                                                                                                                    |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\dot{\Delta}$   | velocidade de deslocamento da extremidade <u>superi</u> or do trecho livre dos tirantes.                                           |
| $\Delta_d$       | $\Delta$ nos ensaios de fluência para os intervalos de tempo entre 40 e 80 minutos.                                                |
| $\Delta(x)$      | deslocamento de um ponto do bulbo de ancoragem <u>si</u> tuado a uma distância (x) da extremidade inferior do mesmo.               |
| $\Delta(0)$      | deslocamento da extremidade inferior do bulbo <u>an</u> corado.                                                                    |
| $\epsilon$       | deformação específica axial.                                                                                                       |
| $\dot{\epsilon}$ | velocidade de deformação, %/min.                                                                                                   |
| $\epsilon_1$     | deformação específica axial.                                                                                                       |
| $\epsilon_{rup}$ | deformação específica na ruptura.                                                                                                  |
| $\epsilon_v$     | deformação volumétrica.                                                                                                            |
| $\sigma_1$       | tensão principal maior, vertical.                                                                                                  |
| $\sigma_3$       | tensão principal menor, horizontal.                                                                                                |
| $\sigma_{Rm}$    | resistência a compressão da argamassa.                                                                                             |
| $\sigma_{Tm}$    | resistência a tração da argamassa.                                                                                                 |
| $\sigma(x)$      | tensão normal equivalente verificada num ponto do bulbo de ancoragem situado a uma distância (x) da extremidade inferior do mesmo. |

$\sigma'_1$  tensão principal maior efetiva, vertical.

$\sigma'_3$  tensão principal menor efetiva, horizontal.

$(\sigma'_1 - \sigma'_3) = \sigma_d$  tensão-desvio.

$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max} = \sigma_{d\max}$  tensão-desvio máxima.

$(\sigma'_1 / \sigma'_3)$  relação entre tensões efetivas.

$(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$  máxima relação entre tensões efetivas.

$\tau(x)$  tensão cisalhante atuante num ponto do bulbo de ancoragem situado a uma distância (x) da extremidade inferior do mesmo.

$\chi$  fator de fluência.

$\phi$  diâmetro do corpo de prova.

$\phi'$  ângulo de atrito efetivo.